



Armin Grasnick

Grundlagen der virtuellen Realität

Von der Entdeckung der
Perspektive bis zur VR-Brille

EXTRAS ONLINE



Springer Vieweg

Grundlagen der virtuellen Realität

Armin Grasnick

Grundlagen der virtuellen Realität

Von der Entdeckung der Perspektive bis
zur VR-Brille



Springer Vieweg

Dr. Armin Grasnick
Moos-Bankholzen
Baden-Württemberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-60784-8 ISBN 978-3-662-60785-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60785-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnetet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags.
Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Martin Boerger
Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Gewidmet meiner geliebten Frau Annett, ohne die
dieses Buch keinen Anfang genommen und auch
kein Ende gefunden hätte.*

Vorwort

Perspektiven aus der Sicht von Riesen

Es scheint ein Grundbedürfnis des modernen Marketings zu sein, jegliche Weiterentwicklung mit dem Etikett der Innovation zu versehen. Innovation wird beständig ganz selbstverständlich mit Erfindung gleichgesetzt. Dabei wird dieser Begriff in seiner ursprünglichen Bedeutung (im Sinne des Ökonomen Schumpeter) deutlich allgemeiner verwendet (aus [1], S. 91)

„Technologische Veränderungen in der Produktion von Gütern, die schon auf dem Markt sind, die Erschließung neuer Märkte oder neuer Hilfsquellen, Taylorisierung der Arbeit, verbesserte Materialbehandlung, die Einrichtung neuer Geschäftsorganisationen wie etwa von Warenhäusern — kurz, jedes „Andersmachen“ im Gesamtbereich des Wirtschaftslebens —, das alles sind Beispiele dessen, was wir Innovation nennen wollen.“

Da aber Innovation nicht zwangsläufig Erfindung bedeutet¹, sondern lediglich irgendeine Veränderung beschreibt und überdies mittlerweile etwas angestaubt anmutet², ist der Hinweis auf eine Innovation längst nicht mehr ausreichend, um die Konsumenten zum Kauf zu motivieren. Also müssen größere Kaliber her. Um die absolute Neuheit eines Produktes anzupreisen bedient man sich deshalb gern der „Weltneuheit“. Wer es etwas martialischer mag, kündigt gar eine „Revolution“ an. Marx hatte schon in seinem „Kapital“ die revolutionäre Idee³ des

¹Schumpeter verwendet den Begriff der Innovation losgelöst von dem Begriff der Erfindung: „Innovation ist möglich ohne irgendeine Tätigkeit, die sich als Erfindung bezeichnen lässt, und Erfindung löst nicht notwendig Innovation aus, sondern bringt, für sich, ..., keine wirtschaftlich bedeutungsvolle Wirkung hervor.“ (aus [1] S. 91) s. a. [2].

²Immerhin verwendete ihn Schumpeter bereits seit den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts in seiner „Theory of Innovations“ (in [3], S. 87 ff.).

³Deutlich revolutionärer als „Das Kapital“ ist das „Manifest der Kommunistischen Partei“. Es gipfelt in der Aussage: „Sie [die Kommunisten] erklären es offen, dass ihre Zwecke nur erreicht werden können durch den gewaltsamen Umsturz aller bisherigen Gesellschaftsordnung. Mögen die herrschenden Klassen vor einer Kommunistischen Revolution zittern. Die Proletarier haben nichts zu verlieren, als ihre Ketten. Sie haben eine Welt zu gewinnen.“ (aus [4], S. 23).

grundlegenden Verfalls von Profiten⁴ proklamiert. Die unabänderliche Verringerung des Gewinnes etablierter Unternehmen führt zum Auftritt neuer Markteilnehmer mit frischen Ideen, die einen medialen Hype verursachen und so den unabwendbaren Ruin auch großer Firmen herbeiführen können. Das ermöglicht es den Start-Ups ihren Erfolg auf den Ruinen der gescheiterten Vorgänger zu errichten. Diese „schöpferische Zerstörung“⁵ ist die elegantere und weniger blutige Form der Revolution. In den 1990er Jahren hatten Bower und Christensen dieses Konzept zur Erklärung des Scheiterns großer Unternehmen genutzt und als „disruptive Technologien“ bezeichnet [6]. Das betagte Konzept der Disruption⁶ ist jedoch keineswegs veraltet, sondern durchaus „en vogue“. Eine disruptive Grundhaltung findet sich beispielsweise in Facebooks Mantra „Move fast and break things“ [7] und 2015 galt die Disruption der „Frankfurter Allgemeinen“ als Wort des Jahres unter Deutschlands Geschäftsleuten [8].

Am Beispiel der Innovation lässt sich eines recht gut illustrieren. Auch wenn moderne Erzeugnisse gern mit den Etiketten Weltneuheit, Revolution oder Disruption ausgezeichnet werden, so bleibt doch die vorherige Entwicklungsgeschichte bestehen. In Wahrheit haben auch die modernsten Technologien historische Vorläufer und sind in den seltensten Fällen völlig überraschend aufgetaucht. Mitunter ist eine neue Technologie nur eine zeitgemäße Adaption einer früheren Technik, die mit den heute verfügbaren Mitteln und Verfahren zu besseren oder schnelleren Ergebnissen führt. Noch jede Smartphone-Kamera basiert auf der Idee der Camera obscura, deren grundsätzliche Funktionsweise seit mehr als zwei Jahrtausenden zum Stand der Technik gehört.

Als ich mit der Arbeit zu diesem Buch begann, hatte ich zunächst geplant, mich vordergründig auf die technische Beschreibung der bildgebenden Darstellung zu konzentrieren. Je intensiver ich mich bei meinen Recherchen mit den Grundlagen der virtuellen Realität beschäftigte, umso wichtiger erschien mir aber die technikgeschichtliche Einordnung.

Ein Bild muss gesehen werden und dazu benötigt man das visuelle System. Die Augen und das Sehen sind wie der Mensch nicht plötzlich entstanden, sondern die Folgen einer viele Millionen Jahre währenden Evolution. Auch die Technik zur möglichst realistischen Bilderzeugung hat eine evolutionäre Geschichte, die einige Jahrtausende umfasst. Dass der stetige Erkenntnisgewinn immer auch auf dem Vorwissen früherer Generationen beruht, ist keine neue Feststellung.

Johannes von Salisbury zitiert schon 1159 in seinem Werk Metalogicon [9] aus dem Jahre 1159 den Philosophen Bernhard von Chartres mit dem bemerkenswerten Satz.

„Wir sind wie Zwerge, die auf den Schultern von Riesen sitzen, so dass wir mehr und weiter als sie sehen können – allerdings nicht vermöge der eigenen Sehschärfe oder Körpergröße, sondern weil wir durch die riesenhafte Größe in die Höhe emporgehoben und erhöht werden.“⁷

⁴ „Gesetz des tendenziellen Falls der Profitrate“ (in [5], S. 191 ff.).

⁵ „The Process of Creative Destruction“ (Kap. VII in S. 81 ff.).

⁶ In Schumpeters „Business Cycles“ von 1939 wird zwar auch (schon) die disruptive Innovation erwähnt ([3], S. 101), eine vollständige Beschreibung gibt aber erst Christensen etwa 60 Jahre später.

⁷ dt. Übersetzung von Klinghardt [10], in der lat. Ausgabe „Metalogicus“ [11] von 1610 (III. Buch, IV. Kapitel, S.148): „...ut possimus plura eis & remotiora videre, non utique proprij visus acumine, aut eminentia corporis, sed quia in altum subvehimur & extollimur magnitudine gigantea.“

Newton griff ein halbes Jahrhundert später dieses Bild auf und schrieb im Jahre 1675 in einem Brief an Hooke „If I have seen further it is by standing on ye shoulders of Giants.“⁸. Und so ist es auch auf dem Gebiet der virtuellen Realität. Man kommt nicht umhin, sich ein wenig mit den vormaligen Ideen zu beschäftigen und glaubt nach der Recherche, die Menschen dahinter etwas kennengelernt zu haben. Auf meiner virtuellen Reise durch die Zeit und bei der Lektüre von etwa Tausend Veröffentlichungen bin ich so auf mehr als fünfhundert Persönlichkeiten getroffen, die mir über ihre Bücher und Erfindungen einen Teil ihres Lebens offenbart hatten.

Es scheint mir angemessen, Ihnen diese Personen nach und nach vorzustellen. Da ich davon ausgehe, dass Sie mitunter gern etwas mehr als den Namen erfahren wollen, habe ich mir erlaubt, am Ende des Buches ein Personenregister anzuhängen, in dem ich jedem Einzelnen zumindest eine kurze Zeile spendiert habe. Bei Einigen war das recht einfach, von Anderen sind nur wenige Informationen bekannt, von Manchen ist sogar nur der Name überliefert. Ich habe mich jedoch nach Kräften bemüht zu Jedem immerhin grundlegende Kenntnis zu erlangen und dazu viele zusätzliche Quellen studiert.

In diesem Buch werde ich die Grundlagen der virtuellen Realität zunächst ganz besonders unter dem Aspekt der geschichtlichen Entwicklung betrachten, bevor ich auf die Ausprägung der Technik eingehe. Damit Sie mir folgen können, habe Ihnen meine Quellen vollständig offenbart. Wenn Ihnen nun etwas besonders interessant erscheint und Sie genau zu diesem Sachverhalt mehr wissen wollen, haben Sie so vielleicht einen ersten Anhaltspunkt, von dem Sie Ihre weiteren Studien starten können.

Die virtuelle Realität wird besonders über das Sehen erzeugt. Jede Form der Darstellung basiert dabei auf einer Technik, die verlässlich eine Reproduktion des darzustellenden Objektes ermöglicht. Die meisten Informationen werden über das Auge aufgenommen, wodurch die Kenntnis unserer Umgebung nicht nur maßgeblich visueller Natur ist, sondern dem Wesen nach auch immer perspektivisch. Es ist also ganz natürlich, dass auch der Versuch einer Nachbildung der Wirklichkeit sich hauptsächlich auf die visuelle Komponente stützt und die Nutzung der Perspektive die Kopien umso realistischer wirken lässt.

Das natürliche Sehen funktioniert nur durch die Wahrnehmung des von den Gegenständen ausgehenden Lichtes. Ohne diese erhellenden Strahlen ist die Beobachtung der Umgebung ganz einfach nicht möglich. Die Betrachtung eines Gemäldes in einem dunklen Raum ist genauso nutzlos, wie der Versuch, seinen Laptop mit ausgeschaltetem Backlight nutzen zu wollen. Die Illusion eines Bildes basiert aber nicht auf der Beleuchtung selbst, sondern auf der Interaktion des Lichtes mit den Strukturen und Farben des Objektes durch Reflexion, Absorption, Brechung, Streuung oder Beugung. Was wir sehen, ist nicht wirklich das Objekt, sondern die Veränderung der Lichtwirkung

⁸, „Wenn ich weiter geblickt habe, so deshalb, weil ich auf den Schultern von Riesen stehe.“

des ins Auge gelangenden Lichtes. Die Illusion des Objektes wird erst durch das Licht erzeugt und ist folglich eine Illusion aus Licht.

Eine perfekte Illusion aus Licht muss die Wahrnehmung komplett täuschen und die äußere Gestalt eines Objektes vollständig wiedergeben. Perfekt ist die Täuschung dann, wenn der Betrachter nicht entdecken kann, ob er wirklich das Objekt sieht oder nur eine Abbildung des Gegenstandes. In der Bildschirmtechnik wird mit immer höherer Auflösung, besserer Farbwiedergabe oder einfach schierer Größe versucht, diesem Anspruch immer näher zu kommen. Dennoch bleibt ein entscheidender Unterschied des künstlichen Bildes zur realen Wirklichkeit: Das künstliche Bild liefert nicht die Raumwirkung der echten Szene. Eine Veränderung der eigenen Position bewirkt keine Veränderung der Perspektive im Bild, der räumliche Seheindruck bleibt bescheiden.

Das menschliche Sehen ist aber immer auch räumlich. Eine Wahrnehmung ohne Raumindruck ist unnatürlich. Darum gab und gibt es immer wieder Versuche, die Bildwiedergabe um die Illusion des Raumes zu erweitern. In der Raumbild- oder 3D-Technik wurden und werden die unterschiedlichsten technischen Verfahren genutzt, um die Illusion noch perfekter zu gestalten.

Nach der Veröffentlichung meines Buches „3D ohne 3D-Brille“ [12] vor wenigen Jahren hat die Entwicklung der visuellen Raumdarstellung einen Weg genommen, den ich dort im Kapitel „Grenzen der Stereoskopie“ beschrieben und begründet hatte: Die negativen Effekte der Raumbildtechnik haben zur Ablehnung der 3D-Technologie geführt und als logische Konsequenz begraben nun nach und nach alle großen Hersteller von Unterhaltungselektronik die Produktion von 3D-Fernsehern. Die mediale Resonanz manifestiert sich in Schlagzeilen, wie zum Beispiel „3D-TV is dead“ oder „The end of 3D“. Aber ist das tatsächlich so?

Die Anwendung von „3D“ begrenzt sich nicht nur auf die Aufführung mehr oder minder gelungener Filme mit plastischer Wirkung im Kino oder in der Nutzung einer Virtual-Reality-Brille beim Computerspiel, sondern nimmt einen immer größeren Raum im alltäglichen Leben ein.

Tatsächlich hat die Erfassung und Wiedergabe dreidimensionaler Daten in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

Der Bezug zum 3D-Raum ist beim 3D-Druck noch offensichtlich. Bei Anwendungen in der Robotik, der künstlichen Intelligenz oder gar beim autonomen Fahren ist die Notwendigkeit einer 3D-Beschreibung des Raumes schon weit weniger augenscheinlich. Bei näherer Betrachtung wird jedoch schnell klar, dass in den genannten Beispielen eine räumliche Orientierung erforderlich ist. Diese Raumorientierung bezieht sich dabei nicht nur auf die Kenntnis der Eigenposition. Spätestens am Beispiel des autonomen Fahrens wird deutlich, dass auch eine Abschätzung von Entfernungen zu anderen Objekten von erheblichem Vorteil ist.

Die uns bekannte Realität wird heute nicht nur in 3D virtualisiert, sondern dabei um zusätzliche Informationen erweitert und mit der realen Welt vermischt.

Die Bezeichnung „3D“ wird wohl derzeit ein wenig „old-fashioned“ und wenig hipp wahrgenommen. Deutlich beliebter sind alle Namen, die gut zu dem englischen Wort für Realität

passen, wie z. B. „Virtual Reality“⁹, „Augmented Reality“¹⁰ oder „Mixed Reality“¹¹. Bei den heutigen interaktiven 3D-Brillen versucht man ganz einfach die Produktnamen zu etablieren (z. B. „RIFT“¹², „Zeiss VR One“¹³ oder „Playstation VR“¹⁴). Gern werden natürlich auch modern und technologisch fortschrittlich klingende Namen in Verbindung mit „Digital“ oder „Lightfield“¹⁵ verwendet oder gar mit einem vorgeblichen Bezug zur Holografie¹⁶.

Man muss natürlich nicht unbedingt auf der Abkürzung „3D“ zur Beschreibung eines dreidimensionalen Raumes bestehen. Der Übergang von der realen Umgebung in die virtuelle Welt ist nicht einmal zwingend an die Existenz eines räumlichen Modells gebunden, die virtuelle oder erweiterte Realität kann auch eine Überlagerung rein zweidimensionaler Daten sein. Normalerweise wird jedoch auch eine Verortung der Daten und Objekte oder zumindest die Auswertung der Kopfposition des Betrachters gewünscht. Der Bildeindruck soll sich der Perspektive des Betrachters anpassen.

Hintergrundinformation

Im Jahre 1999 besuchte mich Cees van Berkel¹⁷ in meinem Labor und wir diskutierten die Unterschiede zwischen seinem 3D-Monitor (Philips 3D¹⁸) und meinem (4D-Vision¹⁹). Im Verlauf der Debatte sagte Cees: „Im Prinzip ist deine 3D-Maske ja auch nur ein Linsenraster“. Natürlich habe ich sofort protestiert und auf die Gegensätze hingewiesen, aber im Grundsatz hatte Cees absolut recht. Es kommt eben auf die Betrachtungsweise, die Perspektive, an.

Ich habe mich seitdem beharrlich mit der Darstellung beschäftigt und über die Jahre die unterschiedlichsten Systeme zur Vorspiegelung künstlicher Realität erforscht. Dabei ist immer deutlicher geworden, dass trotz der häufigen Betonung der Unterschiede in den verschiedenen Verfahren die Gemeinsamkeiten überwiegen. Die unterschiedlichen VR-Techniken sind durchaus miteinander vergleichbar.

Eine Perspektive bezeichnet die Wahrnehmung eines Sachverhaltes von einem bestimmten Standpunkt aus, beschreibt also die Betrachtungsweise. Die Perspektive ist aber ebenfalls die Beobachtung einer 3D-Szene aus einer Betrachtungsposition. Das ist die gewöhnliche Vorgehensweise bei der Aufzeichnung einer realen Szene. Aus mehreren Perspektiven entsteht bei geeigneter Wiedergabe durch einfache Betrachtung die Illusion der Realität.

Die Betrachtung eines Objektes aus mehreren Perspektiven scheint für sich genommen noch nicht die Bezeichnung zu 3D verdienen. Das aber ist das eigentliche Wesen der

⁹Virtuelle Realität, auch in der Abkürzung „VR“.

¹⁰Erweiterte Realität, auch in der Abkürzung „AR“.

¹¹Gemixte Realität, in der Abkürzung „MR“.

¹²Für die 3D-Brille von OCULUS.

¹³Für die 3D-Brille von CARL ZEISS.

¹⁴Für die 3D-Brille von SONY.

¹⁵Oder auch gleich gemeinsam, wie z. B. im „Digital Lightfield“ für die 3D-Darstellung von MAGIC LEAP.

¹⁶Z. B. „Holographic Video“ für das 3D-Rendering von OTOY.

¹⁷Damals bei Philips Research Laboratories in Redhill, UK.

¹⁸Mit Linsenraster.

¹⁹Mit Parallax-Barriere.

Raumwahrnehmung: Erst die Unterschiedlichkeit des Gesehenen aus verschiedenen Perspektiven führt zu einem räumlichen Eindruck. Diese Vision beruht weder auf Einbildung noch Halluzination, sondern ist die Grundfunktion des räumlichen Sehens.

3D ist trotzdem nur ein Teil des großen Perspektivbildes. Aus dem Lichtfeld oder einem Hologramm einer Szene lässt sich der aufgezeichnete Raum rekonstruieren – nicht nur darstellen. Man kann sich nun in diesem virtuellen Raum bewegen, darin messen oder mit höchster Auflösung wiederum daraus eine bestimmte Perspektive gewinnen.

Ist die Perspektive also das Wesentliche? Eine Perspektive ist die Projektion des Raumes auf eine Fläche, vom dreidimensionalen Raum auf irgendeinen zweidimensionalen Sensor, von einer höherwertigen Dimension auf eine niedrigere. Die Perspektive selbst kann dreidimensional sei, wenn zum Beispiel aus einem vierdimensionalen Raum nur eine 3D-Ansicht gewonnen wird. Ein zweidimensionales Bild kann auch von einer Serie aus eindimensionalen Messwerten erstellt werden.

Reales 3D ist dabei keineswegs statisch. Die Anordnung der Objekte im Raum und die eigene Perspektive verändern sich bei der Betrachtung kontinuierlich. Die reale Welt ist den Elementen unterworfen; Wind und Wellen, Licht und Schatten verändern die äußere Erscheinung des Beobachtungsobjektes ständig. Die Veränderungen im Zeitverlauf verlangen nach der Beschreibung durch eine weitere Dimension: der Zeit. Damit wird unsere Welt vierdimensional (4D). Perspektive, Raum, Zeit und Vision sind die Fundamente der räumlichen Wahrnehmung und Illusion.

Ich will in diesem Buch den Dingen auf den Grund gehen und Ihnen die verschiedenen Verfahren zur Darstellung von der Antike bis zur Gegenwart nahebringen, aber auch besonders auf die Gemeinsamkeiten der Technologien hinweisen. Es wird Ihnen auffallen, dass auch die modernsten Technologien häufig nur aktuelle Umsetzungen historischer Erfindungen sind. Gemeinsam haben alle Techniken aber eines. Sie liefern immer Illusionen aus Licht.

Die perfekte Illusion ist nach wie vor eine Vision. Ein Gerät, dessen Bildwiedergabe sich nicht mehr von der Realität unterscheiden lässt, wurde noch nicht vorgestellt. Dennoch sind die Grundlagen gelegt, um die Vision der Illusion vielleicht schon bald Wirklichkeit werden zu lassen.

Dieses Buch ist ein Versuch, die Entwicklung künstlicher Perspektiven insgesamt zu beschreiben und daraus die Grundlagen der virtuellen Realität zu entwickeln. Vielleicht kann aber manches von dem Alten, was schon vor langer Zeit bedacht wurde, heute als Grundlage oder Inspiration für etwas Neues dienen. Oder, um es mit Walt Disney zu sagen²⁰.

„If you can dream it, you can do it. Remember that this whole thing started with a dream and a mouse.“

Halbinsel Höri im Bodensee
Herbst 2019

Armin Grasnick

²⁰Aus einem Werbevideo der Walt Disney Company zur Neueröffnung des „Horizons“ im Walt Disney World Resort in Florida im Jahre 1983.

Literatur

1. Schumpeter JA. Konjunkturzyklen: Eine theoretische, historische und statistische Analyse des kapitalistischen Prozesses. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht; 1961.
2. Schumpeter JA. Capitalism, socialism and democracy. 2. Aufl. New York: Harper & Brothers Publishers; 1942.
3. Schumpeter JA. Business cycles: a theoretical, historical and statistical analysis of the capitalist process. New York und London: McGraw-Hill Book Company; 1939.
4. Marx K, Engels F. Manifest der Kommunistischen Partei. London: Bildungs-Gesellschaft für Arbeiter; 1848.
5. Marx K. Das Kapital. Engels F, Herausgeber. Hamburg: Otto Meissner; 1894.
6. Bower JL, Christensen CM. Disruptive technologies: catching the wave. Harv Bus Rev. 1995;73(1):43–53.
7. WIRED. Mark Zuckerberg's Letter to Investors: „The Hacker Way“. WIRED. 1. Februar 2012. <https://www.wired.com/2012/02/zuck-letter/>. Zugegriffen: 22. Dez. 2018.
8. Meck G, Weiguny B. Das Wirtschaftswort des Jahres: Disruption, Baby, Disruption! Frankfurter Allgemeine. 2015. https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftswissen/das-wirtschaftswort-des-jahres-disruption-baby-disruption-13985491-p2.html?printPagedArticle=true#pageIndex_1. Zugegriffen: 22. Dez. 2018.
9. von Salisbury J. The metalogicon of John of Salisbury: a twelfth-century defense of the verbal and logical arts of the trivium. Berkeley: University of California Press; 1955.
10. Klinghardt M. Das älteste Evangelium und die Entstehung der kanonischen Evangelien. Tübingen: Francke; 2015.
11. von Salisbury J. Metalogicus : E codice M.S. Academiae Cantabrigensis. Paris: Beysl; 1610.
12. Grasnick A. 3D ohne 3D-Brille: Handbuch der Autostereoskopie. Springer; 2016. <http://www.springer.com/de/book/9783642305092#aboutBook>.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Illusionserzeugung	2
1.2 Licht und Schatten	6
1.3 Holograph und Holoskopie	7
1.4 What the Hell...?	10
Literatur	14
2 Entdeckung der Perspektive	17
2.1 Lichtsinn	18
2.2 Paleo-VR	43
2.3 Historische Sehtheorien	46
2.4 Antike Perspektiven	69
2.5 Projektionen aus dem Mittelalter	81
2.6 Multiperspektiven	99
Literatur	107
3 Bilder aus Licht	121
3.1 Camera obscura	122
3.2 Laterna magica	137
3.3 Sonnenmikroskop	154
3.4 Bewegte Bilder	157
3.5 Fernsehen	187
3.6 Flüssige Kristalle	189
3.7 Leuchtende Kristalle	196
3.8 Strahlendes Plasma	199
Literatur	201
4 Virtuelle Illusionen	213
4.1 Natürliches Raumsehen	214
4.2 Binokulare Raumwahrnehmung	220
4.3 Raumstörung	226

4.4	Stereoskope	231
4.5	3D-Brillen	239
4.6	Naked eye.....	250
4.7	Autostereoskopie	260
4.8	Lichtfeld.....	282
	Literatur.....	289
5	Virtuelle Räume	299
5.1	Panoramen	300
5.2	Duplizierte Realität	306
5.3	Interaktion	311
5.4	Reale Virtualität	331
	Literatur.....	354
6	Schlussbetrachtung.....	365
	Literatur.....	369
	Personenregister	371
	Stichwortverzeichnis.....	427



Einleitung

1

Zusammenfassung

Aus technischer Sicht können heute alle relevanten Eigenschaften einer Szene in bester Qualität wiedergegeben werden – bis auf den Raumeindruck. Die Wiedergabe dieser so wichtigen Eigenschaft ist nach wie vor unbefriedigend. Häufig sind Raumbild-Techniken noch an 3D-Brillen gebunden, die als unangenehm empfunden werden können. VR-Brillen sind gegenüber dem historischen Stereoskop zwar fortschrittlich – aber dennoch Brillen. Und so hat sich eine gewisse Ablehnung der 3D-Technik etabliert, die zu dem Fehlschluss verleiten könnte, die 3D-Darstellung wäre reine Zeitverschwendungen. Doch 3D-Aufnahmen sind in der Medizin längst alltägliche Notwendigkeit und müssen für die Tiefenwahrnehmung während eines Eingriffes auch wieder in 3D dargestellt werden. Vollständige 3D-Daten werden nicht nur für den 3D-Druck benötigt, sondern sind auch für eine interaktive Visualisierung unentbehrlich. Autonome Systeme und Roboter benötigen 3D-Informationen, um sicher im Raum navigieren zu können. Ich möchte Ihnen zeigen, dass immer wieder erstaunliche Technologien entwickelt wurden, um die Illusion der Realität zu verbessern, die Wirklichkeit aufzuzeichnen und wiederzugeben. Die Erzeugung einer realistischen Illusion ist keine unnötige Spielerei, sondern nimmt einen immer größeren Raum im täglichen Leben ein. Wer es will, der kann schon heute Raumbilder erzeugen und ohne 3D-Brille darstellen. Machen Sie sich mit der Technik der Illusion vertraut. Es ist an der Zeit.

1.1 Illusionserzeugung

Die Technik der Bilder

► **Trailer**

„In der Hoffnung auf viele friedlich-farbige, aber auch spannend-farbige Ereignisse“

(Willy Brandt anlässlich des Starts des Deutschen Farbfernsehens auf der 25. Großen Deutschen Funk-Ausstellung in Berlin am 25. August 1967 [1]).

Vor etwa einem halben Jahrhundert wurde das Farbfernsehen in Deutschland offiziell eingeführt. Bis zu diesem Zeitpunkt waren noch nicht einmal 40 Jahre vergangen, seitdem das elektronische Schwarz-Weiß-Fernsehen erstmalig vorgestellt wurde. Der allgemeine Wunsch nach lebensechter, farbiger Darstellung hat in dieser vergleichsweise kurzen Zeit die Innovationskraft erheblich befeuert und schließlich zu einer Technik geführt, die in der Lage ist, die natürlichen Farben zu imitieren.

Der Mensch ist neben der natürlichen Farbwahrnehmung ebenso natürlich zur Wahrnehmung anderer Eigenschaften einer Szene fähig, allen voran Bewegung, Auflösung und Raumanordnung.

Die heutige Technik hält viele Möglichkeiten bereit, eine Szene naturgetreu wiederzugeben. Ein aktueller Fernseher im Hochformat kann durchaus einen erwachsenen Mann überragen und Alltagsobjekte in Originalgröße darstellen. Selbst schnellste Bewegungen werden mit höchsten Bildwiederholraten flüssig dargestellt, die Auflösungen der Geräte sind längst hoch genug, um noch kleinste Details darzustellen.

Ganz ohne Zweifel will der Mensch seit jeher seine Umgebung möglichst naturgetreu wiedergeben und bedient sich dazu seit Urzeiten der Perspektive. Auf diese Weise gibt der Mensch das wieder, was er vorher so ähnlich bereits gesehen hat. Das Auge des Betrachters ist das Instrument, welches die Wahrnehmung diktiert und erst die Illusion einer Perspektive schafft. Daher ist das Auge der allererste Gegenstand unserer perspektivischen Betrachtung. Im Kapitel „Entdeckung der Perspektive“ werden sodann verschiedene Formen der perspektivischen Darstellung in unterschiedlichen Stadien der Menschheitsgeschichte vorgestellt – von der Steinzeit, über die Antike bis hin zur Renaissance. Eine Perspektive kann dabei überraschende Eigenschaften aufweisen und beispielsweise nur von einem ganz bestimmten Punkt aus wahrnehmbar sein, wie es bei einer anamorphen Abbildung der Fall ist. Dabei muss eine Perspektive nicht einmal solitär auftreten. Schon das natürliche Raumsehen ermöglicht die Wahrnehmung zweier unterschiedlicher Perspektiven zur gleichen Zeit. Einige oder mehrere Perspektiven können als Wechselbilder simultan wiedergegeben werden. Hierbei werden nun zwar unterschiedliche Perspektiven gleichzeitig dargestellt, das wahrgenommene Bild bleibt aber flach. Im Prinzip sehen beide Augen das gleiche Bild und erhalten so eine Wahrnehmung,

die im Wesentlichen dem Sehen des Einäugigen entspricht. Erstaunlicherweise kann aber auch der Einäugige 3D-Sehen¹. Ein kleines Experiment wird Ihnen zeigen, wie überraschend gut das gelingen kann.

Das Sehen einer Raumillusion bedingt das Vorhandensein einer anständigen Wiedergabe. Die Entwicklung der entsprechenden Techniken ist im Kapitel „Bilder aus Licht“ dargestellt. Durch die Beobachtung der Gestirne entstand in der Antike der Wunsch nach Hilfsmitteln zu deren genauerer Verfolgung. Die ersten Abbildungen einer Camera obscura waren vermutlich die der Sonne und in deren Schein erkannte man schon früh die bildgebende Kraft des Lichtes. Zauberlaterne und Schreckenslampe erzeugten mittels dieser Abbildung mitunter eine unerfreuliche Illusion, die in der Folge noch mit etwas Bewegung für erhöhten Realismus und größeren Schrecken angereichert wurde. Die immer bessere Beleuchtung der Projektion ermöglichte nicht nur ernsthaftere Untersuchungen durch das Sonnenmikroskop, sondern beflogte auch die Darstellung von Bewegung. Die Geräte waren bis zu dieser Zeit vollständig mechanisch. Die Entdeckung der Elektrizität katapultierte die Technik in eine neue Ära. Die Übertragung von Bild und Bewegung war nun über größte Entfernung, ja sogar Kontinente. In kürzester Zeit entstand eine Vielzahl an Fernsehgeräten, die mit größerem Bild auch immer in die Tiefe wuchsen. Ein großes Bild verlangte einfach nach einem riesigen Möbel. Erst die Entwicklung der Flachbildschirme erlaubte die Kreation wirklich flacher Bildwiedergabegeräte.

Üblicherweise war dann auch der Bildeindruck flach. Wenn aber im natürlichen Sehen mit beiden Augen oder sogar einem einzelnen Auge ein 3D-Eindruck gewonnen werden kann, warum sieht man dann auf einem Bildschirm immer nur ein flaches Bild? Die Begründung liegt in der Art der Darstellung der Perspektiven. Sind die Perspektiven nicht nur doppelt vorhanden, sondern auch dergestalt wiedergegeben, dass sie zusammen ein 3D-Bild ergeben, spricht man von Stereoskopie. Den Raumeindruck, oder besser gesagt die Illusion des Raumes kann auf verschiedene Arten erreicht werden. Davon erzählt das Kapitel „Virtuelle Illusionen“. Die Mittel der Wahl sind dabei optischer Natur (z. B. Spiegel, Linsen, Prismen) oder nutzen die Möglichkeit einer gezielten Verdeckung (z. B. Farbfilter, Polarisation, Shutter, Zeitparallaxe). Mit einigem Training kann 3D-Sehen auch ganz ohne 3D-Brille gelingen. Den Parallel- oder Kreuzblick nun ausreichend zuverlässig und ohne Anstrengung auszuführen ist nicht jedem Menschen gegeben. Daher entstand bereits vor mehr als 100 Jahren der Wunsch, eine 3D-Darstellung ohne die Anwendung von „Augengymnastik“ oder die Nutzung von 3D-Brillen zu erreichen. Diese Technik wird unter dem Oberbegriff „Autostereoskopie“ zusammengefasst. Aber auch in der Autostereoskopie bleiben Wünsche offen. So bleibt der Betrachtungswinkel häufig eingeschränkt oder die Auflösung der Darstellung ist deutlich reduziert. Praktisch werden diese Einschränkungen durch das optische Raster, welches aus dem 2D-Bildschirm einen 3D-Bildschirm macht, erzeugt.

¹...und in Deutschland am Straßenverkehr teilnehmen, was eine ausreichende Raumwahrnehmung voraussetzt [2] (Anlage 6: Anforderungen an das Sehvermögen).

Der virtuelle Raum, den ein 3D-Monitor erzeugt, ist aber immer durch die Größe des Anzeigesystems begrenzt.

Wäre es nicht wunderbar, auf den Bildschirm verzichten zu können, um mittendrin im Geschehen zu sein?

Das auch dieser Wunsch erreichbar ist, wird im Kapitel „Virtuelle Räume“ beschrieben. Es ist begreiflich, dass die ersten virtuellen Räume in realen Rundgebäuden installiert wurden. Diese begehbarer Panoramen erfüllten den Wunsch nach einer virtuellen Umgebung schon im Ansatz, ließen aber keine Möglichkeit zur Darstellung echter Bewegung zu. Mit dem Beginn großformatiger Kino-Projektionen endlich Bewegung in die Sache. Mehr noch, die Bewegung blieb nicht auf die Leinwand beschränkt, sondern dehnte sich bis auf den Beobachter aus. Der Beginn von Interaktion mit der Darstellung begann mit der Entwicklung von Schieß- und Flugtrainern zur Zeit des ersten Weltkrieges.

Echte Interaktion ist aber keineswegs ans Kriegstreiben gebunden. Nach dem Ende des zweiten Weltkrieges begann die Entwicklung der Computertechnik. Durch diese neue Technologie konnten nun spezielle virtuelle Räume geschaffen werden, die zu der jeweiligen Position des Betrachters passten. Ein auf den Kopf geschnalltes Stereoskop lieferte dem Betrachter dazu eine wunderbare Illusion. Diese Head-Mounted-Displays in verschiedenster Ausprägung sind das am häufigsten verwendete Motiv, auf das man stößt, wenn man sich intensiv mit der virtuellen Realität beschäftigt.

Solche Systeme können einen außerordentlichen Raumeindruck liefern, zwingen aber den Träger des 3D-Gestells aber auch zu einer Abschottung von der Welt. Die Interaktion mit der Umwelt steht unter der Einschränkung „Nur gucken, nicht anfassen“.

Die künstliche Realität sollte nicht an die Nutzung von Brillen, Displays oder Headsets gebunden sein. Dazu werden im Kapitel „Virtuelle Räume“ weitere Überlegungen angestellt. Aber wie sieht eine naturgetreue Wiedergabe aus, wie muss man sich das ultimative 3D-Display vorstellen? Bekannte Zukunftsvisionen sind die Projektion der Prinzessin Leia aus Star Wars oder des „Medizinisch-Holografischen Notfallprogramms“ vom Raumschiff Voyager. Eine scheinbar nahliegende Ausführung ist auch das „Holo-deck“ aus der Fernsehserie Star Trek. Eine visuelle Annäherung könnte irgendwann gelingen, aber wird man die Objekte dann auch berühren und fühlen können? Haptische Projektionen gelingen nur in Ansätzen, von einer fühlbaren Interaktion mit einer realistischen Grafik kann kaum die Rede sein. Ein echtes Erlebnis kann aber auch ohne reales Sehen, Fühlen oder Hören stattfinden – z. B. im Traum. Die geschriebene Vision² dazu existiert bereits als „Phantomatik“ und beschreibt die Stimulation der Sinne oder direkt des Gehirns zur Erzeugung einer künstlichen Realität. Diese direkte Form der virtuellen Wahrheit wird in dem Film „Matrix“ thematisiert, worin diese erweiterte, aber völlig ungewollte Realität dramatisch inszeniert wurde.

²Bereits 1964 beschreibt Stanislaw Lem in der „Summa technologiae“ [3] die virtuelle Realität.

Auch die ausgereiftesten Verfahren der virtuellen Realität nutzen aber im Wesentlichen die periphere Virtualisierung durch die Schaffung bestimmter, zumeist visueller Reize.

Die Reproduktion von Materie und damit eine reale Rekonstruktion von Objekten gelingt bisher nur im 3D-Drucker unter definierten Bedingungen und fernab der Illusion von Interaktion oder gar Echtzeit. Eine Verarbeitung oder Darstellung von realen Raumdaten in Echtzeit ist so nicht möglich. Um Objekte im Raum zu schaffen, die tatsächlich existieren, um die man herumlaufen und mit denen man interagieren kann, bedient man sich der Volumendarstellung. Natürlich verzichtet man dann wieder auf die Möglichkeit der Berührung der virtuellen Objekte. Neben verschiedenen Voxel-Systemen ist die Holografie das eleganteste der Verfahren. Die Aufnahme erfolgt nunmehr sogar ohne Kamera, dafür wird zur Aufnahme kohärentes Licht benötigt, das in der Natur im Prinzip nicht vorkommt. Zur Beleuchtung wird also ein Laser benötigt. Die Rekonstruktion kann allerdings mit normalem Licht erfolgen, wodurch sich die Anwendbarkeit erhöht. Zur Lösung des Beleuchtungsproblems bietet sich eine Kombination von Autostereoskopie und Holografie an, womit nun eigentlich alle Probleme gelöst sein sollten. Ein bestimmter Teil des Hologramms enthält jetzt die Perspektive und die abbildende Optik in Form eines Interferenzmusters gleichzeitig. Die Auflösung des Bildes kann so hoch sein, dass diese autostereoskopischen Strukturen unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegen und somit nicht mehr störend wirken. Allerdings entsteht so ein anderes Problem. Die Auflösung des Bildschirms müsste so hoch sein, dass kein heutiger Monitor in der Lage wäre, ein derartiges Interferenzbild wiederzugeben.

Es scheint eine unübersehbare Vielfalt an Technologien zur Darstellung virtueller Realität zu geben. Deshalb ist zum Schluss noch ein kurzer Abschnitt angefügt, in dem ein Versuch der Sortierung und Einordnung der Technik gemacht wird.

Alle bisher genannten Verfahren beschreiben nur das, was schon existiert. Es steht außer Zweifel, dass neue Technologien entstehen werden, die viele der bisherigen Nachteile überwinden werden. Aber werden die neuen Techniken auch Perspektiven nutzen? Kann die Nutzung der althergebrachten Perspektive überhaupt etwas Neues hervorbringen? Die Betrachtung der Perspektive als Vision erlaubt einen anderen Standpunkt. Sieht man die uns umgebende Welt als ein Feld von verteilten Reizen an, dass von den Sinnen im Raum erfasst wird, lässt sich eine reale Szene auch als ein Ereignisfeld interpretieren. Die Aufzeichnung dieses Ereignisfeldes aus unterschiedlichen Perspektiven erlaubt wiederum die Rekonstruktion des Raumes. Wenn bei der Aufnahme eine Vielzahl von Kameras gleichzeitig eingesetzt werden, können auch sich bewegende Szenen aufgezeichnet und analysiert werden. Üblicherweise kommt dazu ein Sensor mit möglichst hoher Auflösung zum Einsatz. Überraschenderweise lassen sich auch Bilder aufnehmen, wenn der Sensor nur über einen einzigen Pixel verfügt. Allerdings zeichnet eine Single-Pixel-Kamera letztlich nur die Intensität des einfallenden Lichtes auf. Betrachtet man auch die Phase des einfallenden Lichtes, kommt man wieder auf die Holografie zurück. Hierbei wird eine dreidimensionale Szene auf ein zweidimensionales Medium aufgezeichnet und bei Bedarf wieder rekonstruiert. Dadurch findet eine Reduktion des

benötigten Aufzeichnungsmediums um eine Dimension statt. Überträgt man diese Idee in einen größeren Maßstab, könnte man nach dem holografischen Prinzip das gesamte Universum auf einer riesigen Fläche speichern.

Es zeigt sich deutlich, dass die Technik zur Aufnahme und Wiedergabe der Realität in vielen Varianten und Abwandlungen existiert. Es wird für jede neue Anwendung notwendig sein, die beste Methode für den konkreten Fall zu selektieren.

In den nachfolgenden Kapiteln wird ein umfassender Überblick über die unterschiedlichen Verfahren gegeben, der eine geschichtliche Einordnung, fundierte Auswahl und professionelle Anwendung von Bildtechnologie und Raumbildtechnik ermöglichen soll.

Dieses Buch soll aber vor allem eines sein: Ein Anstifter für eigene Ideen durch Kenntnis der Grundlagen der virtuellen Realität.

1.2 Licht und Schatten

Licht als Grundlage der Abbildung

Es steht außer Frage, dass eine Abbildung ohne die erhellende Kraft des Lichtes für den Menschen nicht wahrnehmbar ist. Die optische Wahrnehmung der Umwelt basiert auf der sensorischen Erfassung des Lichtes, das die Objekte in beobachteten Raum erst sichtbar macht. Der physiologische Aufbau des Auges erlaubt das Sehen nur in einem begrenzten Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums, der demzufolge auch das „sichtbare Spektrum“ genannt wird (s. Abb. 1.1).

Die Ausbreitung des Lichtes erfolgt geradlinig von einem leuchtenden Punkt in unterschiedliche Raumrichtungen. Die abgestrahlte Intensität und die Wellenlänge des Lichtes unzähliger Punkte ergeben ein Strahlungsfeld aus unendlich vielen Lichtstrahlen – das Lichtfeld. Die Intensität des Gesehenen wird als Helligkeit wahrgenommen, ein gewisser Wellenlängenbereich ergibt den Eindruck einer bestimmten Farbe. Das von den betrachteten Objekten ausgehende Lichtfeld kann aus unterschiedlichen Positionen gesehen werden und ergibt von jedem neuen Standpunkt einen etwas veränderten

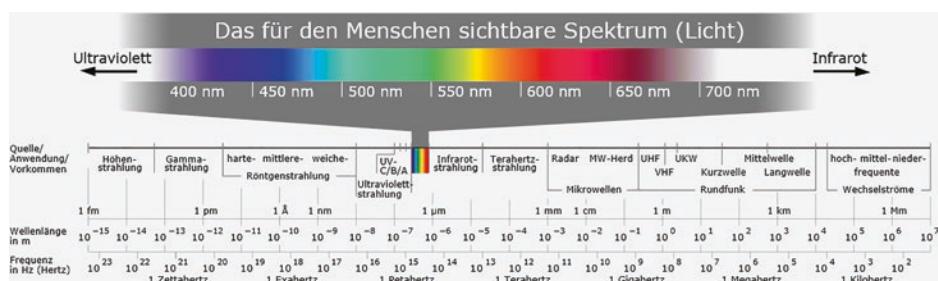


Abb. 1.1 Elektromagnetisches Spektrum, Horst Frank/Phrood/Anony (2008), Wikimedia Commons

Seheindruck. Dieser Eindruck entspricht im Wesentlichen einer geometrischen Zentralprojektion der Szene mit dem Auge als Fluchtpunkt. Die Wahrnehmung des Lichtfeldes von einem bestimmten Ort erzeugt im Auge des Betrachters die Projektion dieser Ansicht als ortsabhängige Perspektive.

Die Projektion eines Bildes stellt den umgekehrten Prozess des Sehens dar. Die aufgezeichnete Perspektive wird beleuchtet und mit einem Projektor auf eine geeignete Fläche „geworfen“. Schon die lateinische Urform „projectio“ bezeichnet das Vor- oder Hervorwerfen von etwas. Die deutsche Bezeichnung Bildwerfer beschreibt diesen Prozess ausgezeichnet.

Nachdem die Wiedergabe für lange Zeit nur als statisches Bild möglich war, wurde zum Ende des 19. Jhdts. auch die mechanische Wiedergabe bewegte Bilder möglich. Mit der Nutzung des elektrischen Stroms begann auch eine Elektrifizierung der Darstellungstechnik. Auch hier gilt die Forderung nach Beleuchtung. Immer hellere Glühbirnen lieferten besseres Licht und erlaubten größere Projektionen. Bei einer Fernsehröhre kann ganz und gar auf eine Beleuchtung verzichtet werden. Hier leuchtet der vom Kathodenstrahl getroffene Phosphor und liefert so das wahrnehmbare Licht. Ein Flachbildschirm verfügt in der Regel wieder über eine Hintergrundbeleuchtung, die für normale Lichtverhältnisse im Gebäudeinneren ganz passabel ist. Bei der Betrachtung eines Laptopbildschirms am sonnigen Strand hat man diesen positiven Eindruck nicht mehr. Die Helligkeit hat aber nicht nur einen Einfluss auf die Lesbarkeit, sondern auch auf den Realismus der Wiedergabe.

Die Helligkeit des Tageslichtes kann derzeit von keinem Bildschirm wiedergeben werden. Und so ist auch eine hochauflösende Abbildung eines sonnigen Strandes einfach als das zu erkennen, was es ist – ein schönes, aber unvollständiges Bild der Wirklichkeit.

1.3 Holograph und Holoskopie

Mögliche und unmögliche Wortbildungen in 3D

► **Trailer**

Unter einem „Holograph“ könnte man ein Aufzeichnungsgerät für Hologramme oder die Berufsbezeichnung eines Herstellers von Hologrammen verstehen. Tatsächlich wird das Wort „Holograph“³ aber im deutschen Sprachraum üblicherweise nicht in diesem Zusammenhang verwendet, sondern gelegentlich als Bezeichnung für ein eigenhändig verfasstes und vom Verfasser unterzeichnetes Dokument verwendet⁴. Im englischen Sprachraum ist

³Das Wort existiert im Wörterbuch der deutschen Sprache weder in der Schreibweise „Holograph“ noch „Holograf“.

⁴Dann als „Holographon“ oder „Holografon“ bzw. „Holographum“ oder „Holografum“.

diese Auslegung üblicher [4], in der kanadischen Provinz Ontario sogar ein feststehender Rechtsbegriff (holograph will⁵).

Der Begriff „Holoskopie“ scheint sich vorzüglich als Oberbegriff für die gesamt 3D-Technologie zu eignen, da dieser als Zusammensetzung aus dem Präfix „holo“⁶ und dem Suffix „skopie“⁷ in der Bedeutung „das Ganze vollständig beobachten“ den Sachverhalt erstklassig beschreibt: Man betrachtet die Dinge vollständig, in allen Dimensionen, dreidimensional. Ein ausgezeichneter Fachbegriff, der allerdings kaum verwendet ist.

Diese beiden Beispiele zeigen schon, dass auch in der 3D-Technik die Begriffe nicht immer erwartungsgemäß gebraucht werden, sondern in Bedeutung oder Bezeichnung vom Üblichen abweichen können.

3D-Präfixe

In der Raumbildtechnik werden einige Vorsilben (Präfixe) häufig gebraucht und im Zusammenhang mit anderen Begriffen genutzt. Die Kenntnis dieser Präfixe erleichtert das Verständnis spezieller 3D-Wortschöpfungen. In der nachfolgenden Tabelle ist übliche Bedeutung der jeweiligen Wörter dem Indogermanischen Etymologischen Wörterbuch [6], dem Lateinisch Etymologischen Wörterbuch [7] beziehungsweise dem Altgriechischen Herkunftswörterbuch [8] entnommen und dabei –wo es nötig erschien– um die gebräuchliche Bedeutung ergänzt (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 3D-Präfixe

Präfix	übliche Bedeutung	Nutzung
Stere-	Starr, fest, hart (auch körperlich → räumlich)	Stereoskop, Stereoskopie, Stereofotografie
Holo-	Ganz, völlig, vollständig	Holografie, Hologramm
Auto-	Selbst, allein	Autostereoskopie, Autofokus
Multi-	Viel, vielfach, zahlreich	Multiview, Multifokus, multispektral
Super-	Über, oberhalb	Superresolution, Supermultiview
Hyper-	Über, über ... hinaus, oberhalb (zumeist als Steigerung von Super)	Hyperstereo ^a , Hyperview

^aStereofotografie mit vergrößerter Stereobasis

⁵Ein handschriftliches, vom Verfasser unterzeichnetes Testament [5].

⁶Aus dem griechischen „hólos“ abgeleitet in der Bedeutung von ganz, völlig, vollständig.

⁷Aus dem griechischen „skopein“ abgeleitet in der Bedeutung von beobachten, zielen, untersuchen [6], S. 984,

3D-Suffixe

Analog zu den Präfixen haben auch die Suffixe eine übliche Bedeutung, die auf die wahrscheinliche Anwendung eines so benannten Dinges hinweist. Ein mit „-meter“ bezeichnetes Gerät wird vermutlich für die Messung von irgendetwas eingesetzt, mit einem „-skop“ wird man etwas beobachten wollen (Tab. 1.2).

Die übliche Bezeichnung 3D (oder 3-D⁸) ist bekanntermaßen nur die Abkürzung für „dreidimensional“.

Aber wussten Sie auch, dass Laser nur das Akronym für „Light amplification by stimulated emission of radiation“⁹ ist? Diese Bezeichnung wurde von einem Doktoranden¹⁰ der Columbia University namens Gordon Gould geprägt, der die Bezeichnung und Abkürzung erstmalig¹¹ in seinem 1957 Laborbuch¹² erwähnte [14].

Tab. 1.2 3D-Suffixe

Suffix	übliche Bedeutung	Anwendung
• -graph oder -graf	Aufzeichnungsgerät oder Berufsbezeichnung	Stereograph, Perspektograph
• -meter	Messgerät	Photometer, Perspektometer ^a , Stereometer ^b
• -graphie oder -grafie	Prozess der Aufzeichnung	Stereografie, Holografie
• -gramm	das Aufgezeichnete	Stereogramm, Hologramm
• -skop	Beobachtungsgerät	Teleskop, Stereoskop, Oszilloskop
• -skopie	Beobachtungstechnik	Mikroskopie, Stereoskopie, Autostereoskopie

^aHilfsmittel zur Ermittlung der geodätischen Orientierung von Ballonaufnahmen [9]

^bAls Stereometer wurde ursprünglich (seit dem frühen 19. Jhd., s. a. [10]) ein Apparat zur Bestimmung des Volumens von Pulvern verwendet [11]. Im Zusammenhang mit der Stereobildauswertung wurde etwa ab Beginn des 20. Jhd. die Bezeichnung Stereometer für ein Gerät benutzt, mit dem die Abstände gleicher Objekte in einem Stereobildpaar vermessen werden konnten (z. B. von Pulfrich [12])

⁸Die vom Duden empfohlene Form ist „3-D“, allerdings ist die Schreibweise „3D“ gebräuchlicher.

⁹Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung.

¹⁰Beim Nobelpreisträger Polykarp Kusch.

¹¹Wobei hier nicht unerwähnt bleiben soll, dass Charles Townes an der gleichen Universität wenige Jahre zuvor den MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) entwickelte und dafür gemeinsam mit Nikolai Bassow und Alexander Prochorow 1964 den Nobelpreis erhielt „...for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle“ [13].

¹²Gould schreibt dort: „Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“.

1.4 What the Hell...?

Autostereoskopie, Holografie oder virtuelle Realität?

In der Literatur werden unterschiedliche Bezeichnungen zur Beschreibung einer möglichst wirklichkeitsnahen Nachbildung der Realität genutzt. Die Erläuterung von Unterschieden oder Gemeinsamkeiten der Bezeichnungen ist in der Regel kein Bestandteil einer technischen Ausbildung. Tatsächlich werden die Bezeichnungen mitunter missverständlich¹³ oder ohne weitere Erläuterung rein plakativ verwendet. Die Kenntnis der Bedeutung einiger grundlegender Begriffe der 3D-Darstellung ist für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel von Vorteil. Deshalb sollen in diesem Abschnitt einige der gebräuchlichsten Wortschöpfungen vorgestellt werden.

Stereoskopie

Der Begriff Stereoskopie wurde 1838 durch Charles Wheatstone geprägt, der in einem Beitrag über die Physiologie des Sehens auch „über einige bemerkenswerte und bisher nicht beobachtete Phänomene des binokularen Sehens“ berichtete [15]. Grundsätzlich umfasst die Stereoskopie alle Verfahren zur Aufnahme und Wiedergabe räumlicher Bilder. Üblicherweise werden mit dem Begriff Stereoskopie aber nur diejenigen Verfahren und Techniken bezeichnet, die auf irgendeine Art ein stereoskopischen Bildpaar, bestehend aus einem rechten und einem linken Bild, aufzeichnen oder wiedergeben.

► Stereoskopie bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren, bei denen eine 3D-Raumillusion durch ein stereoskopisches Bildpaar entsteht.

Autostereoskopie

Unter dem Begriff der Autostereoskopie (seltener auch Auto-Stereoskopie) fasst man üblicherweise diejenigen Technologien zusammen, die einen der Raumeindruck mit den grundsätzlichen Mitteln der Stereoskopie ermöglichen, ohne, dass dabei eine 3D-Brille benötigt wird¹⁴. Die nachfolgende Definition ist dem Handbuch der Autostereoskopie [16] entnommen.

► Autostereoskopie bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren, bei denen eine 3D-Raumillusion unter Verzicht auf 3D-Brillen durch binokulare Darstellung erreicht wird.

Die Bezeichnung „Automultiscopy“ tritt vereinzelt im englischen Sprachraum auf¹⁵ und meint im Prinzip das Gleiche. Hier soll in der Wortschöpfung insbesondere auf

¹³Oder mitunter sogar absichtlich falsch, um eine bestimmte (zumeist eigene) Technologie in der Medienresonanz künstlich zu überhöhen.

¹⁴Daher auch die Bezeichnung als „3D ohne 3D-Brille“ oder „glasses free 3D“.

¹⁵Die deutsche Entsprechung „Automultiskopie“ wird überhaupt nicht verwendet.

die gleichzeitige Verwendung mehrerer (multipler) Perspektiven hingewiesen werden. Dadurch liegt in dieser Bezeichnung eine ungünstige Verquickung aus dem automatischen Prozess der 3D-Wahrnehmung (auto + skopie) und der verwendeten Technologie (multi) vor.

- ▶ Für alle Verfahren gemäß obiger Definition wird die Verwendung des Begriffes „Autostereoskopie“ empfohlen.

Eine Beschreibung verschiedener Technologien zur Autostereoskopie findet im Kapitel „Virtuelle Illusionen“ im Abschnitt Autostereoskopie.

Lichtfeld

Hauptsächlich in den USA und in jüngerer Zeit wird für eine räumliche Verteilung der Begriff „Lichtfeld¹⁶“ verwendet. Grundsätzlich nutzt man in dieser Art der Beschreibung das physikalische Modell eines Feldes, in dem verschiedene messbare physikalische Größen¹⁷ räumlich definiert angeordnet sind. Der russische Physiker Gershun beschrieb 1936 die fotometrische Verteilung des Lichtes als messbare Intensität. Anhand der englischen Übersetzung „The Light Field“ [17] wurde die Idee mit den Anfängen der Computergrafik wieder aktiviert und erhielt spätestens mit der Lichtfeldkamera von Lytro aktuelle Aufmerksamkeit. Dabei wird nun besonders die Eigenschaft hervorgehoben, dass die Wahrnehmung des Lichtfeldes abhängig von der Betrachterposition und der Betrachtungsrichtung ist. Ein beidäugig betrachtetes Lichtfeld ist demnach dreidimensional. Der Begriff Light Field wird häufig im Zusammenhang mit Autostereoskopie und insbesondere Integralfotografie genannt.

- ▶ Ein Lichtfeld beschreibt die Verteilung der Lichtintensitäten in einem Raum, in dem von allen Punkten aus in alle Richtungen hin gemessen wird.

In der praktischen Anwendung wird das Lichtfeld häufig mittels eines Kamera- oder Mikrolinsenarrays aufgezeichnet oder über ein Linsenraster wiedergegeben. Ein Lichtfeld-Datensatz kann also durchaus zweidimensional aufgezeichnet und rekonstruiert werden. In diesem Sinne ähnelt die Lichtfeldtechnik der Holografie, allerdings werden bei der Holografie die Welleneigenschaften des Lichtes genutzt – beim Lichtfeld die reinen Intensitätseffekte der Strahlung.

¹⁶Light field.

¹⁷Im elektrischen Feld die Feldstärke, im Lichtfeld die Lichtintensität.

In Anlehnung an den Begriff „Holografie“ könnte man bei einem Verfahren unter Ausnutzung des Lichtfelds mit einiger Berechtigung auch von „Lumografie“¹⁸ sprechen. Tatsächlich wurde 1996 von einem Team um Gortler eine Berechnung von Perspektiven basierend auf der Theorie des Lichtfelds vorgeschlagen, die den Titel „The Lumigraph“ trug [18].

Das Lichtfeld wird nochmals eingehend im Kapitel „Virtuelle Illusionen“ im Abschnitt „Lichtfeld“ besprochen.

Holografie

Als Gabor an einem Ostertag des Jahres 1947 versuchte, die Auflösung eines Elektronenmikroskopes¹⁹ zu verbessern, ging er dabei von der grundlegenden Idee der Trennung zwischen Aufnahme und Wiedergabe bei der Abbildung aus. Im ersten Schritt wird eine fotografische Aufnahme der gesamten Information einer Szene erstellt, die in einem zweiten Schritt wieder vollständig rekonstruiert wird [20]²⁰. Bei Verwendung geeigneten Lichtes bei Aufnahme und Wiedergabe ist der Bildeindruck dann sogar dreidimensional. Gabor schlug dafür zunächst den Namen „Holoskop²¹“ vor, der den Sachverhalt recht kompakt beschreibt. Da er aber die Bilder zu diesem Zeitpunkt bereits als Hologramme²² bezeichnete, ist der Name „Holografie“ für das Verfahren dann doch deutlich passender²³.

► Die Holografie bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren, bei denen eine dreidimensionale Abbildung unter Nutzung der Welleneigenschaften des Lichtes erfolgt.

Auf die Holografie wird später nochmals eingegangen.

Virtuelle Realität

Die Realität²⁴ bezeichnet die Gesamtheit des Wirklichen. Dinge in der Realität existieren tatsächlich. Virtualität bezeichnet dagegen das mit dem Wirklichen vergleichbare, aber nicht reale Vorhandensein maßgeblicher Eigenschaften der Realität. Dinge in der Virtualität existieren nur scheinbar. Virtuelle Realität ist also das angebliche Vorhandensein der Wirklichkeit, eine Illusion der Realität.

¹⁸Luminis (lat.) = Licht.

¹⁹In der Erstveröffentlichung 1948 schlägt er für seine neuartige Methode die Bezeichnung „electron interference microscope“ vor [19].

²⁰Gabor berichtet darüber in seinem Vortrag anlässlich der Verleihung des Nobelpreises.

²¹„Moreover three-dimensional objects may be recorded in one photograph, hence the suggested name „holoscope“ which means „entire“ or „whole“ vision.“ (aus [21]).

²²„holograms“ (aus [21]).

²³„-gramm“ das Aufgezeichnete, „-grafie“ der Prozess der Aufzeichnung.

²⁴Lat. realitas.

► Die virtuelle Realität beschreibt den Sinneseindruck von Wirklichkeit durch künstliche Stimulation der Wahrnehmung.

In Platons Höhlengleichnis²⁵ erzählt Sokrates seinem Schüler Glaukon zur Illustration der Wahrnehmung von Realität eine fiktive Geschichte von Höhlenbewohnern, die „von Kindheit an gefesselt an Kopf und Schenkeln“ immer nur die Schatten von absichtlichen Täuschungen sehen und niemals die Dinge selbst. Sokrates nimmt nun an, dass diese Gefangenen nicht imstande sein können, die Realität von der Fiktion zu unterscheiden, da die wahre Gestalt der Dinge ihnen gänzlich unbekannt ist (aus [22], S. 362):

„Auf keine Weise also können diese etwas anderes für das wahre halten als die Schatten jener Kunstwerke?“

Diese Form der Erzeugung einer scheinbaren Realität setzt einen massiven Eingriff in die Persönlichkeitsrechte voraus und ist mit legalen Mitteln kaum zu bewerkstelligen.

Ovid verdanken wir die Geschichte des Pygmalion und seiner überaus realistisch elfenbeinernen Plastik, in die sich Pygmalion verliebt und die dann durch die Gnade der Venus zum Leben erwacht [23]. Diese Geschichte inspirierte in den kommenden Jahrhunderten immer wieder zahlreiche Dichter und verführte schließlich auch Goethe zu seiner Jugendgeschichte Pygmalion.

Auch Goethes Weggefährte Herder verwendete dieses fiktive Ereignis in einer philosophischen Abhandlung. Er teilte dort die Dinge in ihre wirkliche Gestalt und sinnliche Wahrnehmung ein und unterschied alsdann zwischen den Sinnen Gefühl und Gesicht zur Empfindung von Körper und Gestalt in der Bildhauerkunst und Malerei [24]

Eine technische Lösung zur Vorspiegelung falscher Tatsachen ohne die tatsächliche Fesselung des Publikums und unter Verzicht auf göttlichen Beistand wäre die Nutzung einer Täuschungsbrille.

1930 lässt Weinbaum in seiner Kurzgeschichte „Pygmalion’s Spectacles“ [25] den seltsamen Professor Ludwig eine eigentümliche Vorrichtung beschreiben, mit der ein Traum Wirklichkeit werden kann (aus [26], S. 174):

„Ich fotografiere die Geschichte in einer Flüssigkeit mit lichtempfindlichen Chromaten. ... Chemisch füge ich Geschmack hinzu, den Ton elektrisch. Wenn dann die Geschichte aufgenommen ist, dann bringe ich die Lösung in meine Brille, meinen Film-Projektor. Ich elektrolysiere die Lösung, die Geschichte, das Bild, den Ton, den Geschmack, den Geruch – alles!“

Diese fiktive Brille zur Wahrnehmung vollständiger virtuelle Realität war eine literarische Anbahnung der technischen Machbarkeit solcher Fiktionen.

Der polnische Schriftsteller Lem unternahm in seiner 1964 erschienenen „Summa technologiae“ [3] den Versuch die unabsehbare Zukunft vorherzusagen. Das gesamte

²⁵Im 7. Buch der Politeia („Der Staat“).

sechste Kapitel widmete Lem dabei der Phantomologie²⁶, die sich u. a. mit dem technischen Problem der Phantomatik²⁷ beschäftigt (aus [3], S. 321):

„Ist es möglich, eine künstliche Realität zu schaffen, die der natürlichen vollkommen ähnlich ist, sich jedoch von ihr in keiner Weise unterscheiden lässt?“

Lem beschreibt in seinem Buch auch eine Brille als Vorsatz für die Augen²⁸ ([3], S. 325) und nimmt damit die spätere Entwicklung der Virtual-Reality-Brillen bereits voraus. Der Begriff künstliche Realität wurde in der englischen Form durch Kruegers Buch „Artificial Reality“ [27] bekannt und als „Virtual Reality“ seit den 90er Jahren des 20. Jhdts. verwendet²⁹.

Literatur

1. Bereczky A. Wandel der Fernsehtechnik in 50 Jahren ZDF. Bewegt seit Generationen 50 Jahre ZDF. ZDF-Pressestelle; 2013. S. 39–41.
2. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Verordnung über die Zulassung von Personen zum Straßenverkehr. Fahrerlaubnis-Verordnung Dez 13, 2010.
3. Lem S. Summa technologiae. 7. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp; 2016.
4. Encyclopædia Britannica. Definition of Holograph by Merriam-Webster. Merriam-Webster. 2017. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/holograph>. Zugegriffen: 30. Dez. 2017.
5. Ministry of the Attorney Ontario, CAGeneral. Holograph will. Glossary of terms. 2015. <https://www.attorneygeneral.jus.gov.on.ca/english/glossary/?id=470#results>. Zugegriffen: 30. Dez. 2017.
6. Pokorny J. Indogermanisches Etymologisches Wörterbuch. Bern: Francke; 1959.
7. Walde A. Lateinisches Etymologisches Wörterbuch. 2. Aufl. Heidelberg: Carl Winters Universitätsbuchhandlung; 1910.
8. Köbler G. Altgriechisches Herkunftswörterbuch. Online; 2007.
9. Scheimpflug T. Über Orientierung von Ballonaufnahmen. In: Dolezal E, Herausgeber. Internationales Archiv für Photogrammetrie, Organ der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie. Wien: K. u. K. Hof-Buchdruckerei Carl Fromme; 1911. S. 34–54.
10. Ventress JA. Description of a Stereometer. In: Brewster D, Herausgeber. The Edinburgh Journal of Science. Edinburgh: John Thomson; 1827. S. 143–5.
11. Bibliographisches Institut, Herausgeber. Meyers Konversations-Lexikon. 4. Aufl. Leipzig; 1885. <http://www.retrorbibliothek.de/retrorib/stoebern.html?werkid=100149>
12. Seliger P. Die stereoskopische Meßmethode in der Praxis. Berlin: Julius Springer; 1911.
13. Nobel Media AB. The Nobel Prize in Physics 1964. Nobelprice.org. 2017. https://www.nobel-prize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1964/. Zugegriffen: 31. Dez. 2017.

²⁶Als „Phantomologie“ bezeichnet Lem die wissenschaftliche Disziplin zur Erforschung der künstlichen Realität.

²⁷„Phantomatik“ bezeichnet die Technik zur Erzeugung der künstlichen Realität.

²⁸Das „Gegenauge“.

²⁹Auch von Krueger selbst, z. B. in seinem späteren Buch „Artificial Reality II“ [28].

14. Gould G. Page from Gould's Lab Notebook (Internet). 1957. <https://photos.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/photos/gould-gordon-h1>.
15. Wheatstone C. Contributions to the Physiology of Vision. -Part the First. On Some Remarkable, and Hitherto Unobserved, Phenomena of Binocular Vision. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1838;128:371–94.
16. Grasnick A. 3D ohne 3D-Brille: Handbuch der Autostereoskopie. Springer; 2016. <http://www.springer.com/de/book/9783642305092#aboutBook>.
17. Gershun A, The Light Field. J Math Phys. 1939;18:51–151.
18. Gortler SJ, Grzeszczuk R, Szeliski R, Cohen MF. The Lumigraph. ACM Press; 1996. S. 43–54.
19. Gabor D. A new microscopic principle. Nature. 1948;161:777–8.
20. Lundqvist S, Herausgeber. Nobel lectures, Physics 1971–1980. Singapore: World Scientific; 1992.
21. Gabor D. Brief an Dr. J. B. le Poole (Delft) als Antwort auf le Poole's Brief vom 21. Januar 1948, in dem er die Bezeichnung „Holoscope“ vorschlägt. 1948.
22. Platon. Der Staat. Schleiermacher F, Herausgeber. Berlin: G. Reimer; 1828.
23. Ovid. Verwandlungen nach Publius Ovidius Naso. Berlin: Friedrich Vieweg der Älttere; 1798.
24. v. Herder JG. Plastik. – Einige Wahrnehmungen über Form und Gestalt aus Pygmalions bildendem Traume. Riga: Johann Friedrich Hartknoch; 1778.
25. Weinbaum SG. Pygmalions spectacles. Wonder Stories. 1935;7:28–39.
26. Weinbaum SG. Pygmalions Brille. Die besten Stories von Stanley G Weinbaum. Moewig Verlag; 1980. S. 171–96.
27. Krueger MW. Artificial reality. Reading: Addison-Wesley; 1983.
28. Krueger MW. Artificial reality II. Reading: Addison-Wesley; 1991.



Entdeckung der Perspektive

2

Die natürliche Wahrnehmung der Perspektive und deren Wiedergabe

Zusammenfassung

Nachdem das Auge in evolutionären Teilschritten über Jahrtausende entstanden war, konnten die Lebewesen ihre Umgebung im wahren Licht sehen. Die visuelle Wahrnehmung war ein evolutionärer Vorteil im ewigen Selektionsprozess, dem „Survival of the Fittest“. Die anatomische Einzigartigkeit, die Kombination aus Sehen, aufrechtem Gang und damit frei verfügbaren Händen, gepaart mit den kognitiven Fähigkeiten des Gehirns, hatte dem Menschen kreative Schöpfungen ermöglicht. Irgendwann hatten die Menschen begonnen, das Gesehene auch wiederzugeben. Die anfänglichen Wandmalereien und Skulpturen wurden in der Antike durch Kunstwerke ersetzt, die einen erstaunlichen Realismus aufwiesen. Die handwerkliche Kunst ging mit einem Erkenntnisdrang einher. Ist das, was man sieht, auch das, was wirklich ist? Ist die Welt real oder virtuell und überhaupt erkennbar? Die ersten Überlegungen zum Sehen wiesen noch eine starke Analogie zum Tastsinn auf, wodurch das Sehen als ein Betasten der Dinge mit den Augen verstanden wurde. Die Abbildung im Auge erfolgt jedoch ohne Berührung. Die Augenlinse ist das Objektiv, das die Objekte auf die Netzhaut des Auges abbildet. Jede Abbildung ist immer die Projektion aus einer bestimmten Betrachtungsposition. Durch Veränderung der Position ändert sich auch die wahrgenommene Perspektive. Die Kenntnis der Perspektive wiederum erlaubt deren Konstruktion – auch ohne reale Vorlagen und damit die realistische Visualisierung virtueller Objekte.

2.1 Lichtsinn

Über die Entwicklung und den Aufbau der Augen

Die Wahrnehmung der Umwelt ist eng mit der Entwicklung der Sinne und ganz besonders mit der Entstehung des Sehens verknüpft. Doch die Entwicklung eines derartig komplexen Organs, wie es das menschliche Auge darstellt, scheint eine Meisterleistung der Evolution zu sein. Selbst der Begründer der Evolutionstheorie hatte einige Schwierigkeiten, seinen Kritikern die Entstehung der Augen durch natürliche Auslese darzulegen. In der „Entstehung der Arten“ ([1], S. 212) schreibt Darwin:

„Die Annahme, dass sogar das Auge mit allen seinen der Nachahmung unerreichbaren Vorrhrichtungen, um den Focus den manchfältigsten Entfernung anzupassen, verschiedene Licht-Mengen zuzulassen und die sphärische und chromatische Abweichung zu verbessern, nur durch Natürliche Züchtung zu dem geworden seye, was es ist, scheint, ich will es offen gestehen, im höchsten möglichen Grade absurd zu seyn.“

Letztlich kommt er aber zu dem Schluss, es sei „....doch keine logische Unmöglichkeit vorhanden, dass irgend ein Organ unter veränderlichen Lebens-Bedingungen durch eine lange Reihe von Abstufungen in seiner Zusammensetzung, deren jede dem Besitzer nützlich ist, endlich jeden begreiflichen Grad von Vollkommenheit auf dem Wege Natürlicher Züchtung erlange.“ ([1], S. 231–232).

Tatsächlich lassen sich animalische Augen und damit die Funktion des Sehens in zahlreichen Fossilien nach der kambrischen Explosion vor 540 Mio. Jahren nachweisen.

Die kambrische Explosion

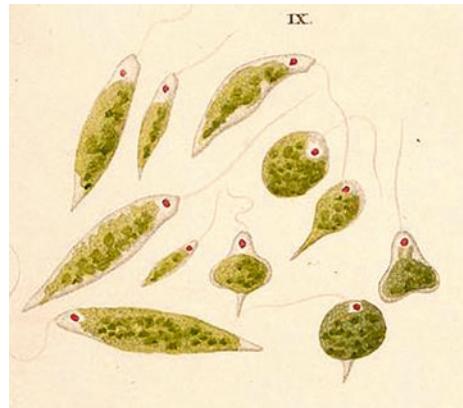
Die Erdfrühzeit (Prekambrium) beginnt mit der Erstarrung der Erdkruste und der Entwicklung einer Atmosphäre. Die veraltete Bezeichnung „Abiotikum“ etikettiert das, was mit dem Begriff definiert werden soll: Ein Zeitabschnitt ohne sichtbare, überlieferte Lebensspuren. Folgerichtig schließt sich daran die Zeit des Auftretens erster Fossilien an – die Erdaltzeit (Paläozoikum), die mit dem Kambrium vor 541 Mio. Jahren beginnt.

Die Begriffe Paläozoikum¹ und Kambrium² wurden von dem englischen Geologen Sedwick Mitte des 19. Jhdts. geprägt, der den Begriff mit Paläozoikum insbesondere mit dem Auftreten von tierischen Fossilien in Verbindung brachte. Dieser Betrachtungsweise kann mit dem gegenwärtigen Wissensstand nicht mehr vollständig zugestimmt werden. So existierten in der Erdfrühzeit nicht nur verschiedene Arten von Bakterien oder Einzellern, sondern sogar vielzellige Weichkörper-Tiere,

¹Die Bezeichnung „Cambridge Palaeozoic Fossils“ wird von Sedgwick zur Klassifikation verwendet (z. B. in [2], S. 139), von von griech. *palaios* = alt und *zōikos* = Tier.

²„...now named by Professor Sedgwick the ‚Upper Cambrian‘“ (aus [3], S. 60). Sedgwick wählte den Namen nach der lat. Bezeichnung „Cambria“ für das walisische „Cymru“, dem Namen von Wales.

Abb. 2.1 Augenthierchen
(*Euglena Viridis*), Christian Gottfried Ehrenberg (1838) in [11], T. VII, Abb. IX



die heute unter dem Namen Ediacara-Fauna³ bekannt sind. Ein dreidimensionales Fossil solcher Organismen wurde 2005 in Süd-China gefunden [5] und belegt die schon damals vorhandene Artenvielfalt. Trotzdem verschiedenartige Fossilien aus dieser Zeit erhalten sind, scheinen sich erst mit der Erdaltzeit die Vorfäder der heutigen Lebewesen etabliert zu haben.

Mit dem Kambrium beginnt das Zeitalter des Lebens im Wasser. Ab dieser Zeit sind nun mehr zahlreiche Fossilien erhalten, die nun auch hartschalige Anteile aufweisen. Innerhalb von nur 10 Mio. Jahren entwickelten sich quasi wie aus dem Nichts die verschiedenartigsten Tiere mit Gliedmaßen, Skelet und sogar Augen. Publikumswirksam spricht Gould 1991 von der „kambrischen Explosion“ [6]. Dieser „Urknoten der Evolution“⁴ war der überschäumende Auftakt der Evolution. Oder wie es der „New Scientist“ vor wenigen Jahren formulierte [8]:

„Life was single-celled and boring for billions of years, then BOOM!“

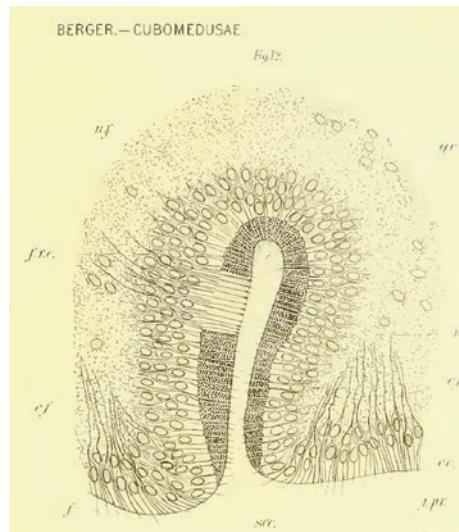
Die einfachsten Lebewesen nach der kambrischen Explosion verfügten nur über lichtempfindliche Zellen, die auch als Augenflecken bezeichnet werden. Seit Urzeiten leben nun die einzelligen Augen- oder Geißeltierchen „*Euglena*“ auf der Erde und bevölkern noch heute nahezu jeden Tümpel. Der Protozoologe Ehrenberg hatte es sich zur Aufgabe gemacht, diese mikroskopischen „Infusionstierchen“⁵ auf seinen Reisen durch Afrika und Asien zu dokumentieren [10]. In seinem Buch „Die Infusionstierchen als vollkommene Organismen“ sind zahlreiche Illustrationen der Kleinstlebewesen abgebildet – natürlich findet sich darunter auch ein Augentierchen. In Abb. 2.1 ist sehr schön der rote Augenpunkt zu sehen.

³Benannt nach dem Fundort der präkambrischen Fossilien, den Ediacara-Hügeln in Australien, entdeckt 1947 vom australischen Bergbauingenieur Sprigg [4].

⁴„Evolution’s Big Bang“ war z. B. die Cover Story des Time Magazine vom 4. Dezember 1995 [7].

⁵Das Damen Conversations Lexikon von 1835 erläutert den Namen so: „Infusionstierchen, die kleinsten, uns sichtbaren, lebenden Geschöpfe, zu deren Kenntnis wir erst durch die Erfindung des zusammengesetzten Mikroskops gekommen sind. Sie sind vielleicht das Wunderbarste und Feinste, was die Natur hervorgebracht hat. Man entwickelt sie aus jeder Substanz, welche der Fäulniß unterworfen ist, durch Aufguß von Wasser (daher Infusionsthiere)“ [9].

Abb. 2.2 Schlitzauge „Simple Eye“ der Würfelqualle, Edward William Berger, 1900 (aus [15], Plate II)



Dieser rote Fleck des grünen Augentieres „*Euglena Viridis*“ ist das sogenannte Stigma, eine Ansammlung von rötlichen Farbpigmenten. Diese Farbpigmente verhindern den Lichteinfall auf den Photorezeptor aus bestimmtem Richtungen, sodass *Euglena* in der Lage ist, sich nach dem Licht zu orientieren (Phototaxis, s. a. [12], S. 311). Da diese erstaunlichen Lebewesen auch zur Photosynthese fähig sind, ist für sie das Schwimmen nach dem Licht überlebenswichtig.

Der als Parafagellarkörper bezeichnete Lichtrezeptor⁶ erzeugt bei der Bestrahlung mit blauem Licht ein Signalmolekül, das dann den Einfall des Lichtes aus einer bestimmten Richtung signalisiert. Da der Photorezeptor eine geordnete Struktur darstellt, erfüllt er schon die Aufgabe eines flachen Sensors. Ein Auge, dass nur von einem zweidimensionalen Sensor und einer Beschattung aus Pigmentzellen gebildet wird, kann als- Flach- oder Plattenauge bezeichnet werden. Solche primitiven Augen finden sich noch heute bei Seesternen oder Quallen. Dabei sind bestimmte Quallen ganz besonders interessant, weil sie über ein gewisses Sortiment an verschiedenen Augen verfügen. Ein erwähnungswürdiges Exemplar ist gewiss die Würfelqualle⁷, die insgesamt 24 Augen in unterschiedlichen Typen in Sechsergruppen (an 4 Positionen, jeweils um 90° versetzt s. a. Abb. 2.4) aufweist [14]. Eine solche Qualle hat tatsächlich auch „Schlitzäugen“. Im Prinzip ist dieses Schlitzauge (s. Abb. 2.2) eigentlich nur ein Grubenauge in unsymmetrischer Ausprägung. Die Grube übernimmt hier nur die Funktion der

⁶Diese Blaulichtrezeptoren wurden erst 2002 in dem Augentierchen *Euglena gracilis* entdeckt [13]. Der etwas sperrige Name „Photoaktivierte Adenylylatcyclase“ (PAC) bezeichnet die Enzyme, aus denen die geordnete lamellenartige kristalline Struktur der Lichtrezeptoren besteht.

⁷Cubozoa oder Cubomedusae, im Englischen ganz einfach der „Box Jellyfish“.

richtungsselektiven Beschattung, so dass die Qualle mit Schlitz- und Grubenauge die Richtung des Lichteinfalls wahrnimmt.

Die proximalen⁸ und distalen⁹ Linsenaugen sind deutlich komplexer aufgebaut und verfügen bereits über abbildende Linsen und eine Retina¹⁰ als Empfänger [14]. Damit ist bereits eine optische Abbildung und nachgelagerte Auswertung möglich. Allerdings habe Würfelquallen kein zentrales Gehirn, was die Nutzbarmachung der Bilddaten erschwert. Die Unterschiedlichkeit der Augen, die Vielzahl und deren Anordnung erlauben dennoch das Navigieren durch einfachste Verknüpfung der neuronalen Schaltkreise, den Nervenbahnen [16].

Der Jenaer Evolutionsforscher Haeckel war auch ein Kenner und Bewunderer der Quallen¹¹ und schwärzte in seinen Reisenotizen (aus [17], S. 61, Nachricht von Lanzerote, Puerto de Arrecife, 27. Januar 1867):

„Alle übrigen Tierformen des hiesigen Meeres werden aber in Schönheit und Zierlichkeit, wie an hohem, wissenschaftlichen Interesse, von den herrlichen Siphonophoren¹² übertrouffen, die ich selbst mir zum speziellen Gegenstand meiner Untersuchung gewählt habe.“

Diese Staatsquallen hatte der Jenaer Lithograph Giltsch für Haeckel so wunderbar illustriert, dass sich Haeckels Begeisterung für diese Tiere durchaus verstehen lässt (Abb. 2.3).

Giltsh hat auch die Augen der Würfelquelle gezeichnet, die die Anordnung der Augengruppen in den herzförmigen Nischen oberhalb und mittig zu den Tentakeln zeigt (Abb. 2.4). In der zugehörigen Beschreibung vermerkt Haeckel dazu, dass die vier Augen untereinander und mit den Tentakeln durch einen starken Nervenring verbunden sind. Dadurch kann die gewünschte Bewegungsrichtung anhand der durch die Augen aufgenommenen Information direkt und ohne Umwege über das ohnehin nicht vorhandene Gehirn an die Tentakel übermittelt werden.

Überraschenderweise sind aus der Zeit der kambrischen Explosion sogar von diesen gallertartigen Medusen der Urzeit Fossilien erhalten geblieben, was nur unter äußerst seltenen Umständen der Fall ist. Derartige Umstände treten dann auf, wenn ein üblicherweise nicht fossil erhaltungsfähiges Lebewesen plötzlich in ein Konservat z. B. aus Eis oder Torf gelangt und so über lange Zeiten erhalten bleiben kann. Diese „Konservatlagerstätten“ stellen heute die wenigen Fundstätten für fossile Quallen [20] dar.

Im Gegensatz zu den fast vollständig aus Wasser bestehenden Quallen sind Fossilien der hartschaligen Trilobiten sind deutlich häufiger anzutreffen. Die Trilobiten waren im

⁸Zur Körpermitte hin gelegen.

⁹Von der Körpermitte entfernt liegend.

¹⁰Netzhaut des Auges.

¹¹Wie sich u. a. auch in der Bezeichnung seines Wohnhauses in der Jenaer Berggasse als „Villa Medusa“ manifestiert.

¹²Staatsquallen, „Siphonophoren“ nach den als Siphonen oder Saugröhren bezeichneten Organen zur Nahrungsaufnahme und Verdauung benannt (s. a. [18], S. 21).

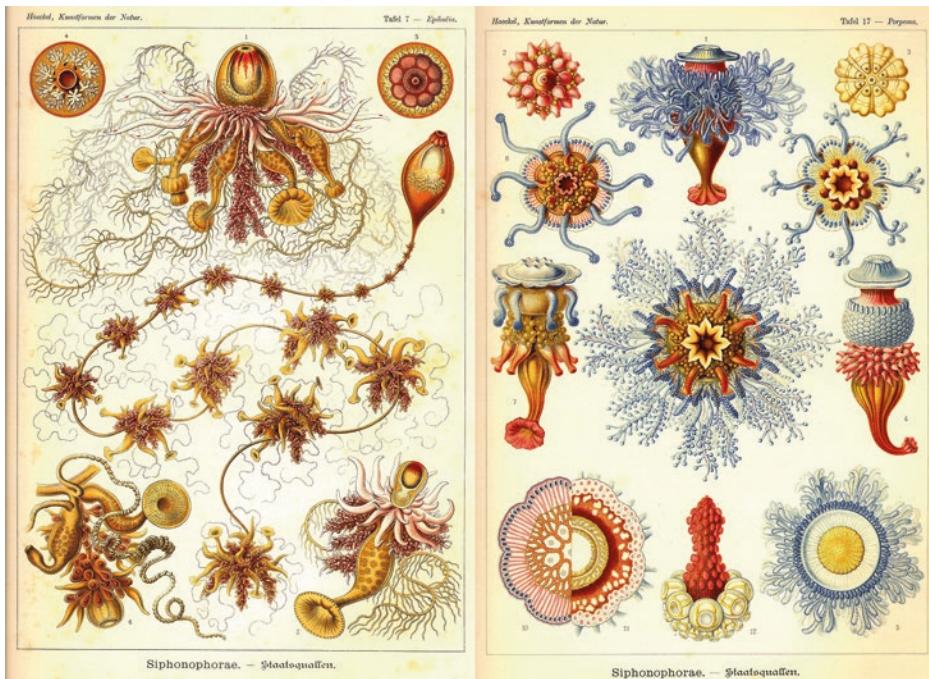
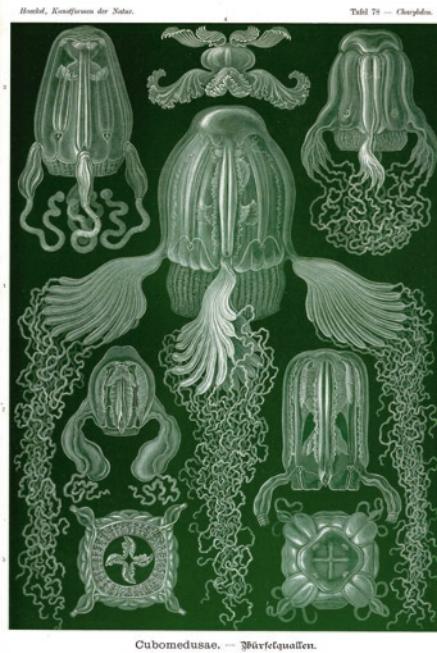


Abb. 2.3 Siphonophorae- Staatsquallen, Ernst Haeckel und Adolf Giltsch (1899), aus [19] Tafeln 7 und 17

Abb. 2.4 Cubomedusae

-Würfelquallen, Ernst Haeckel und Adolf Giltsch (1899), aus [19] Tafel 78



Cubomedusae. — Würfelquallen.

Kambrium mit unzähligen Arten überaus verbreitet und sind mitunter auch namensstiftend für das „Zeitalter der Trilobiten“ ([21], S. 116). Diese Gliederfüßer verfügten über ein Exoskelett, dem wir die heutige Verbreitung als fossile Versteinerung verdanken.

Hintergrundinformation

Der Name Trilobit leitet sich aus dem 1748 veröffentlichten „Systema minerale“ des Predigers Woltersdorff ab. Woltersdorff versuchte sich an einer Einteilung der Mineralien in Anlehnung an die „Systema naturae“ des Herrn Linné [22]. Woltersdorff war mit Linnés Einteilung der Mineralien nicht vollständig einverstanden. So verwendete Linné für diese fossile Versteinerung die Bezeichnung „Entomolithus paradoxus¹³“ ([23], S. 162), was eigentlich nur die Bedeutung „paradoxes versteinertes Insekt“ hat.

Woltersdorf setzt dagegen unter die Rubrik „Versteinte Körper“ die dritte Ordnung „Die versteineten Schalen von Schnecken und Muscheln“. Dort finden wir den „Muschelstein“ und als Unterart den Käfer-Muschelstein „Conchites trilobus“. Die Beschreibung „Rund oder länglich in 3 Erhöhungen abgetheilet, siehet einem Käfer etwas ähnlich“ ([24], S. 42) ist der äußeren Form eines Trilobiten angemessen. Der Jenaer Wissenschaftler Walch war sowohl ein Fachmann der Geologie, als auch ein Meister der Sprache. Nach intensiver Analyse aller Bezeichnungen für diesen Petrefakt¹⁴ kommt er aufgrund der äußeren Gestalt zu einer bis heute gültigen Namensgebung für das steinerne Geschöpf: „Wir wollen ihm die allersimpelste Benennung beylegen und es einen **Trilobiten** nennen.“ ([25], S. 172)

Aus den zahlreichen Versteinerungen der Trilobiten ist bekannt, dass diese bereits (zum Teil) über Augen verfügten. Ein Team um den Paläontologen Clarkson hat die Trilobiten intensiv untersucht [26] und dabei besonders die Facettenaugen¹⁵ in den Fokus genommen.

Ein Trilobit, dessen Augen Clarkson beschreibt, wurde schon 1843 von Portlock [27] gefunden (Abb. 2.5).

Schizochroal oder Holochroal?

Clarke unterteilte 1888 die Augen der Trilobiten nach deren anatomischem Aufbau in zwei große Gruppen (aus [28], S. 254)¹⁶:

- „Die Charakteristik des visuellen Bereichs der Trilobiten ist zweigeteilt;
 - (a) sie kann von einem glatten, durchgehenden Epithelfilm¹⁷ oder einer Hornhaut bedeckt sein, durch die die Linsen der Ommatidien¹⁸ durchsichtig sind, und

¹³Entomolith aus griech. entomon = insekt und lithos = Stein.

¹⁴Veraltet für Versteinerung, aus lat. petra = Stein und factum = gemacht.

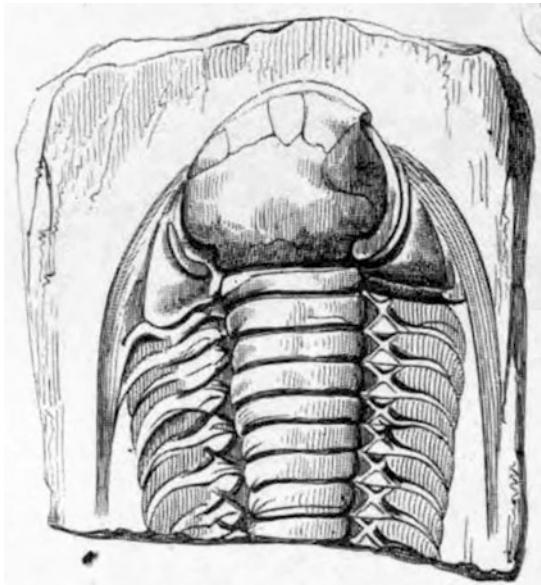
¹⁵Ein Facettenauge ist aus einer Vielzahl von Einzeläugelchen (Ommatidien) zusammengesetzt.

¹⁶Im Original „The character of the visual area in the trilobites is twofold; (a) it may be covered by a smooth, continuous epithelial film or cornea, through which the lenses of the ommatidia are visible by translucence, and b) the cornea may be transected by the protrusion of the sclera and limited to the surfaces of the ommatidia. The first group may be designated by the term Holochroal; the second group by the term Schizochroal.“

¹⁷Deckgewebe.

¹⁸Einzeläugelchen des Facettenauges.

Abb. 2.5 Trilobit, Portlock und Du Noyer (1843), aus [27]
PL 1



b) die Hornhaut kann durch die Protrusion¹⁹ der Sklera²⁰ durchtrennt und auf die Oberflächen der Ommatidien begrenzt werden.

Die erste Gruppe kann mit dem Begriff Holochroal²¹ bezeichnet werden; die zweite Gruppe mit dem Begriff Schizochroal²².“

Die von Jell 1975 [29] hinzugefügte Gruppe der „abathochroalen“²³ Augen wurde von Zhang und Clarkson 1990 diskutiert und stellt die nunmehr dritte Gruppe der Trilobitaugen dar.

Die Linsen sind maximal dicht in hexagonaler Anordnung gesetzt, was eine bessere Lichtnutzung bewirkt (Abb. 2.7). Wie schon Kepler vermutetet, ist die dichteste Kugelpackung einer einzelnen Schicht eine hexagonale²⁴ Anordnung [30].

¹⁹Von lat. protrusio = Hervortreten, nach außen verlagern.

²⁰Lederhaut des Auges (Augenhaut), von griech. skleros = spröde, hart.

²¹Von griech. holos = ganz + chroa = Haut, Farbe.

²²Von griech. schizein = spalten + chroa = Haut, Farbe.

²³Abathochroal, von griech. abathos = flach, platt + chroa = Haut, Farbe.

Jell: „Since it cannot be classified within either of the well established eye types, I propose the name abathochroal for this new type of eye.“

²⁴Sechseckig.

Abb. 2.6 Dichteste Kugelpackung, Johannes Kepler (1611), aus [30], S. 753

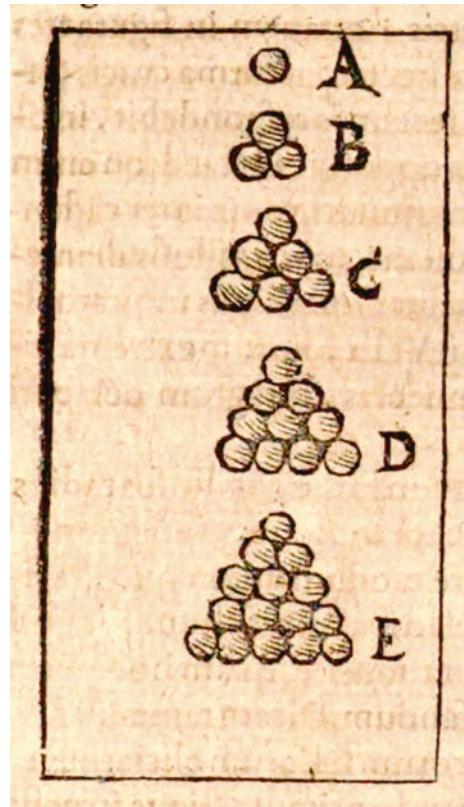


Abb. 2.7 LDUCZ-J422
Dalmanites caudatus
Nahaufnahme, University
College London, Tannis
Davidson (2016), mit
freundlicher Genehmigung des
Grant Museum of Zoology,
University College London



Die Keplersche Vermutung

Kepler versuchte in einem Aufsatz, seinem Freund und Wohltäter Wackenfels zu erläutern, dass sich in der Natur für unterschiedliche Objekte immer wieder bestimmte Arrangements ergeben²⁵. Er stellte sich die Frage, warum eine Schneeflocke immer sechseckig ist und ob vielleicht diese sechseckige Figur aus einer Notwendigkeit des Materials entstünde. Die Fragestellung dehnte Kepler auch auf weitere bekannte Materialien aus und wählt dazu die Waben eines Bienenstocks und die Kerne eines Granatapfels. Vereinfacht man die Objekte zu Kugeln, so ist die Packung am dichtesten, wenn die Kugeln in einer Schicht hexagonal angeordnet sind. In einem Ausschnitt betrachtet, sind die Kugeln in Pyramiden angeordnet (s. Abb. 2.6).

Dieses Problem, das heute als die „Keplersche Vermutung“ bekannt ist, wird im Allgemeinen im Keplerschen Sinne als gelöst betrachtet und ist dennoch für Jahrhunderte unbewiesen geblieben. Lagrange hatte das Problem 1773 auf eine zweidimensionale Ebene reduziert und belegt, dass die hexagonale Packung von Kreisen tatsächlich optimal hinsichtlich der Packungsdichte ist [31]. In höheren Dimensionen ist das Problem eher unbewiesen. Gauß hatte 1831 in einer Rezension einer Theorie von Seeber darauf hingewiesen, dass Seeber im Prinzip die dichteste Packung durch eine definierte hexagonale Gitteranordnung nachgewiesen hatte [32]. Schwierig wird es natürlich dann, wenn das Gitter ungleichmäßig und die Kugeldurchmesser unterschiedlich werden. Toth hat als Lösungsvorschlag die Verwendung einer Computeranalyse anstelle eines klassischen Beweises vorgeschlagen. Der geometrisch-analytische Beweis [33] von Hsiang wurde von der Fachwelt erst gefeiert, dann kritisiert und schließlich abgelehnt. Seit 1998 versucht sich nun ein Team um Hales an einem Computerbeweis [34], der erst 2005 (7 Jahre nach der Einreichung) und trotz noch existierender Zweifel veröffentlicht wurde [35]. 2017 hat Hales nun einen weiteren formalen Beweis veröffentlicht, der mittels einer jahrelangen computerunterstützten Auswertung den damaligen Computerbeweis bestätigt [36].

Das alles kann als Illustration der Schwierigkeit dieses Beweises dienen, aber genauso gut auch der Erkenntnisstärke des Kepler. Wie es scheint, hatte Kepler mit seiner kurzen Betrachtung eine Tatsache entdeckt, deren innenwohnende Theorie einerseits absolut grundlegend und einfach ist, andererseits durch die schnell entstehende Komplexität bei Abweichung von einfachen Anordnungen aber auch äußerst schwierig zu beweisen ist. Die Natur ordnet offensichtlich Objekte gern in einer dichten Packung an, die bei gleichem Volumen den höchsten Füllgrad aufweisen. Dies erhöht nicht nur den Wirkungsgrad in Funktion, sondern verringert auch den Aufwand bei der Erstellung der Struktur – alle aufzubauenden Strukturen sind optimal klein.

Diese unglaubliche genetische Intelligenz der Natur zeigt sich seit Jahrmillionen im Aufbau von Lebewesen. Auch die Facetten der Augen des Trilobiten sind in optimaler Anordnung angelegt (s. Abb. 2.7).

Die Trilobiten sind zwar seit Urzeiten ausgestorben, nicht aber deren komplexer Augenaufbau. Alle heute lebenden Insekten verfügen über Facettenaugen. Ein Bienenauge ist beispielhaft als Nahaufnahme in Abb. 2.8 dargestellt. Bienen können z. B. mit ihren Augen Farben und Formen wahrnehmen, wie der Bienenforscher Frisch in umfangreichen Experimenten nachwies [37]. Die räumliche Auflösung der Facettenaugen und damit die Qualität des Formensinns hängt von der Zahl der Facetten ab. Deren Anzahl

²⁵In dem als Neujahrsgeschenk betitelten Werk „Strena seu de nive sexangula“ (Vom sechseckigen Schnee).

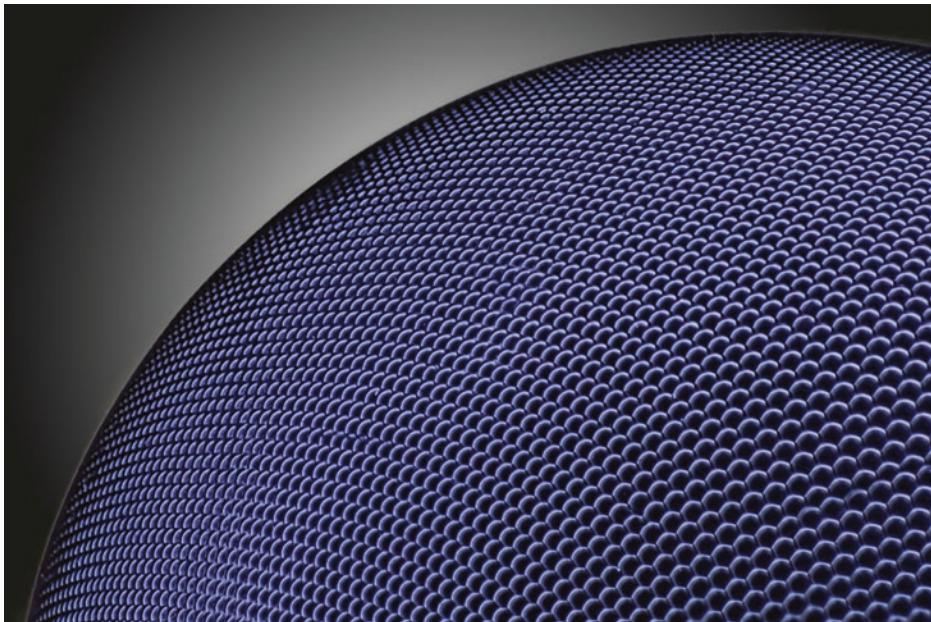


Abb. 2.8 Nahaufnahme eines Bienenauges, Frank Fox (2012), mit freundlicher Genehmigung von Frank Fox (mikro-foto.de)

kann bei Insekten variieren, von gerade einmal einhundert Facetten bei Ameisen bis zu 30.000 bei Libellen [38]. Bei den fliegenden Insekten dienen zusätzliche im Dreieck angeordnete Punktaugen wahrscheinlich als Gleichgewichtsorgan oder Horizontdetektor und zur Kontrolle schneller Flugbewegungen [39]. Die Komplexaugen der Insekten sind auch immer wieder Vorlage zu technischen Lösungen. Setzt man ein Mikrolinsenraster vor einen Bildsensor, so erhält man ein künstliches, lichtempfindliches Superpositionsauge [40]. Ein schönes Beispiel für biologisch inspirierte Computer-Vision²⁶.

Apposition oder Superposition

Exner hatte 1891 in seinem Werk „Die Physiologie der facettirten Augen von Krebsen und Insekten“ eine noch heute gültige Einteilung der Insektaugen in zwei Gruppen vorgenommen. Dabei ging Exner von dem Netzhautbild des jeweiligen Typus aus und unterteilt in Apposition²⁷ und Superposition²⁸ (aus [43], S. 17):

„Nach meinen Erfahrungen lassen sich die zusammengesetzten Augen ihrer optischen Wirkung nach in drei Typen theilen; alle entwerfen ein aufrechtes Netzhautbild, aber in verschiedener Weise.

²⁶Biologically Inspired Computer Vision (s. a. [41, 42]).

²⁷Von lat. apponere = hinzufügen.

²⁸Von lat. super = über + positio = Lage.



Abb. 2.9 Echinacea mit Facettenaugen gesehen, Bearbeitung Grasnick (2018), Original Sappl (2007)

Zwei dieser Typen wirken dioptrisch²⁹, eine hauptsächlich katoptrisch³⁰. Die Netzhautbilder der beiden ersten Typen, von denen zunächst die Rede sein soll, will ich ihrer Entstehungsweise nach als das Appositionsbild und als das Superpositionsbild unterscheiden.“

Der grundsätzliche Aufbau des Appositionsauges ist einfach. Jede einzelne Facette verfügt über eine separate Linse und ein stabförmiges Sehelement, wodurch jedes Einzel-Äugelchen nur einen einzigen Bildpunkt aufnimmt. Ein Bild kommt also nur durch eine Vielzahl von Bildpunkten zustande. Die Bildauflösung eines Appositionsauges ist gering. Ein Ameisenauge hätte eine Bildauflösung von nur 10×10 Pixeln³¹. Eine Ameise kann also nach heutigem Kenntnisstand nur Objekte entdecken, also feststellen, dass da etwas ist [44]. Von einer Objekterkennung oder gar Identifizierung ist die Ameise weit entfernt. Besser sieht da schon eine Libelle mit einer Bildauflösung von 170×170 Pixeln³².

In Abb. 2.9 ist links die Sicht der Ameise dargestellt, rechts die der Libelle.

Das Superpositionsauge ist etwas anders aufgebaut. Exner: „Bei dem jetzt zu besprechenden Auge fallen die den einzelnen Facettengliedern zugehörigen Lichtmassen in der Ebene der Netzhaut zu einem grossen Theile übereinander. Ich nenne diese Art des Netzhautbildes deshalb das Superpositionsbild.“

²⁹Brechend.

³⁰Reflektierend.

Exner bezieht sich hier hauptsächlich auf die Reflexion des Lichtes im Kristallkegel innerhalb der einzelnen Ommatidien.

³¹Bei 100 Ommatidien und einem virtuellen quadratischen Bild.

³²Bei ca. 30.000 Ommatidien und einem virtuellen quadratischen Bild.

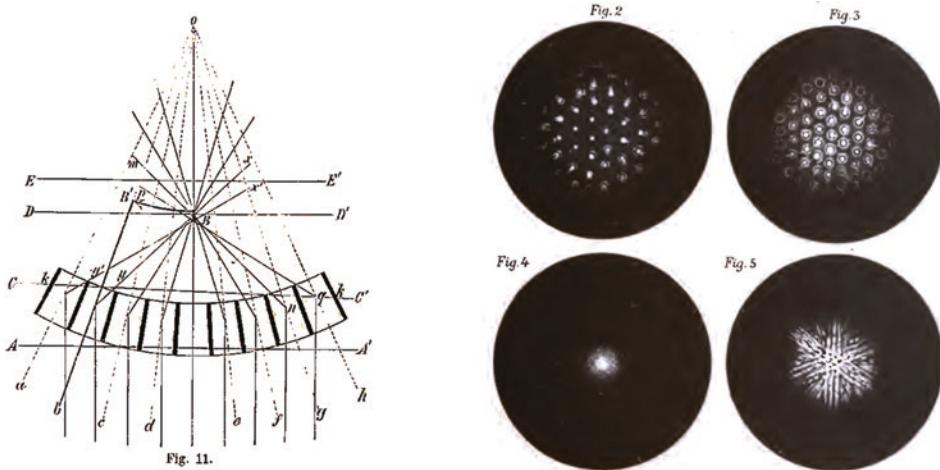


Abb. 2.10 Superpositionsauge mit Netzhautbildern, Sigmund Exner (1891), aus [43], S. 40 Fig. 11 und Taf. 1 Fig. 2–5

Zur Illustration hat Exner die Linsenstruktur des Facettenauges eines Leuchtkäferchens³³ extrahiert, beleuchtet und die entstehenden Bilder aufgezeichnet. Die Bilder entsprechen den Einstellungsebenen AA' (Fig. 2), CC' (Fig. 3), DD' (Fig. 4) und EE' (Fig. 5). Die optische Funktion und besonders der Brennpunkt in der Nähe der Ebene DD' (Fig. 4) ist gut zu sehen (s. Abb. 2.10).

Superpositionsägen sind deutlich lichtempfindlicher als Appositionsaugen und daher besonders bei nachtaktiven Insekten verbreitet (z. B. Glühwürmchen und Motten).

Nachdem es nun deutlich geworden ist, dass bereits die frühesten Lebewesen über mehr oder weniger komplexe Augen verfügten, ist es sicherlich interessant, sich noch einmal Darwins Zweifel nach der Entstehung des Auges durch Zuchtwahl zuzuwenden. Wie ist es möglich, dass ein derartig kompliziertes Gebilde durch Mutation und Auslese entstanden sein kann?

Nimmt man an, dass in jeder Generation nur eine winzige Veränderung stattfindet, kann trotzdem über eine Vielzahl von Generationen auch bei kleinsten Abwandlungen ein deutlicher Wandel stattfinden. Nilsson und Pelger hatten 1994 errechnet, dass auch bei einer winzigsten Abweichung der Parameter der Lichtrezeptoren in Dicke, Breite oder Rezeptorendichte, über viele Generationen aus einem Plattenauge ein Grubenauge und schließlich eine Linsenauge entstehen kann [45]. Allerdings dauert dies auch in dem Modell der schwedischen Forscher noch 364.000 Generationen. Seit dem Kambrium vor über 500 Mio. Jahren ist aber ausreichend Zeit vergangen, dass sich auch die kompliziertesten Augenformen bilden konnten.

³³Lampyris splendidula.

Jede Mutation muss genetisch vererbbar sei, um zuverlässig den Bauplan des neuen Auges zu ändern. Eine Veränderung bei einem Individuum ohne Umgestaltung der Gene trägt nicht zur generationsübergreifenden Merkmalsveränderung bei. Diejenige Gruppe, die eine Mutation weitervererben will, muss natürlich überleben, sich reproduzieren und darf eine gewisse Populationsgröße niemals unterschreiten.

Der Schriftsteller Gaarder lässt den Alberto in seinem Buch „Sofies Welt“ Darwins Entwicklungslehre so zusammenfassen: „Ständige Variationen unter den Individuen ein und derselben Art und hohe Geburtenraten bilden den Rohstoff oder das Material für die Entwicklung des Lebens auf der Erde. Die natürliche Auslese im Kampf ums Dasein ist der Mechanismus oder die Triebkraft hinter dieser Entwicklung. Die natürliche Auslese sorgt dafür, daß immer die Stärksten oder Bestangepaßten überleben.“ (aus [46], S. 491).

Unsere heutigen Augen sind das Produkt der Evolution und erstaunlicherweise seit Urzeiten beinahe unverändert. Goethe formuliert das in dem Gedicht „Metamorphose der Thiere“ (aus [47], S. 89) so:

„Alle Glieder bilden sich aus nach ew'gen Gesetzen,
Und die seltenste Form bewahrt im geheimen das Urbild.“

Der Mediziner Galen war nicht nur zu seiner Zeit eine Autorität, sondern aufgrund seiner umfangreichen Veröffentlichungen³⁴ später auch einflussreich und wirkmächtig. Da zu Galens Lebzeiten das Sezieren von Menschen dem gängigen Totenritus³⁵ widersprach und damit tabu war, nutzte Galen während seiner Tätigkeit als Gladiatorenarzt [48] die zahlreichen Gelegenheiten schwerste Verletzungen zu behandeln um seine Kenntnisse über das Innere des Menschen zu vertiefen. Allerdings ist auch die Behandlung einer schweren Verletzung hinsichtlich des Erkenntnisgewinns keinesfalls mit der Zerlegung eines Menschen vergleichbar. Daher beruhten Galens anatomische Erkenntnisse zumeist auf der Sektion von Tieren und waren im Prinzip die Projektion der tierischen Anatomie auf den Menschen. Dennoch waren Galens anatomische Studien für mehr als ein Jahrtausend die Basis für die medizinische Lehre und Praxis.

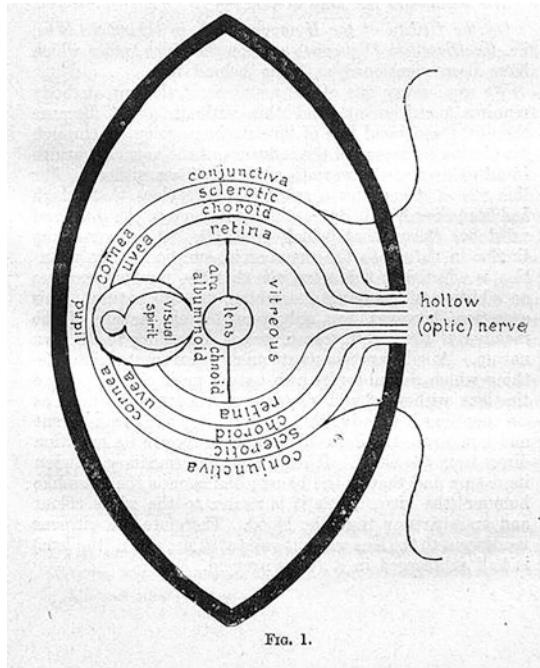
Interessant an Galens Sektionen sind hier vor allem die des Auges. Nach und nach ergibt die Zerlegung des Auges durch Galen die einzelnen uns bekannten Bestandteile preis. Ein paar Beispiele geben die Beschreibungen Galens wieder, wobei gängige Beschreibungen in Klammern dazu gesetzt sind (aus [49], S. 26–28):

- die flüssigem Glase ähnliche Flüssigkeit (Corpus vitreum)
- die netzhähnliche Decke (Retina)

³⁴Galen verfasste hunderte Schriften von denen etliche immer wieder vervielfältigt oder übersetzt und so bis heute erhalten sind.

³⁵Die Bestattung eines Verstorbenen war ein aufwendiges, jahrhundertealtes Ritual und die heilige Pflicht der Hinterbliebenen. Die etwaige Zerstückelung und Nichtbestattung eines Verstorbenen war gänzlich undenkbar und zog gewiss den Zorn der Götter nach sich.

Abb. 2.11 Die Natur des Auges und seine Struktur, Max Meyerhof (1928) nach Hunain Ibn-Ishāq (vor 877) aus [51], S. 5



- der Kreis, aus dem heraus Jemand, der nach dem Auge schaut, das Abbild erblickt (Pupille)
- die hagelkornähnliche Flüssigkeit (Linse)

Galen listet die verschiedenen Gewebe und Flüssigkeiten des Auges auf und kreiert so ein allgemeines Modell aus inneren Flüssigkeiten und begrenzenden Häuten.

Dieses Modell wird von den arabischen Gelehrten des frühen Mittelalters übernommen. Der christliche Arzt Hunain war der Leiter des „Hauses der Weisheit“³⁶ in Bagdad und einer der wichtigsten Übersetzer Galens seiner Zeit. Er verfasste selbst eine Abhandlung über die Augenheilkunde, die von Konstantin dem Afrikaner als Teil seines „Omnia opera“ ins lateinische übertragen wurde [50].

Eine Zeichnung aus der Übersetzung von Meyerhof [51] verdeutlicht den schematischen Charakter des Augenmodells von Hunain (Abb. 2.11). Die Bezeichnungen lehnen sich noch eng an Galen an. Im Text finden sich die Bezeichnungen „eisähnliche Flüssigkeit“ für die Linse oder „netzähnliche Tunica“ für die Retina.

Dieser grundsätzliche Charakter blieb auch bei anderen arabischen Gelehrten erhalten.

³⁶Arab. Bayt al-Hikma, ein Zentrum für wissenschaftliche Übersetzungen der Antike ins Arabische, Akademie und Bibliothek.

Aus dem zu Endes des Jahrtausends n. Chr. von dem arabischen Gelehrten Alhazen verfassten „Schatz der Optik“³⁷ hat Risner in der lateinischen Übersetzung „Opticae thesaurus“ [52] eine Zeichnung Alhazens des übernommen. Dort ist ein Auge im Querschnitt abgebildet, dass ebenfalls aus verschiedenen Häuten (Tunica) und Flüssigkeiten (Aqueus) aufgebaut ist. Die Tunica cornea³⁸ und Tunica uvea³⁹ schließen den „Humor aqueus“⁴⁰ ein und bilden die vordere Augenkammer. Der Augapfel ist vollständig von der Augenhaut umhüllt und mit einer weiteren Flüssigkeit gefüllt (Humor vitreus⁴¹). Am hinteren (im Bild unteren) Ende des Augapfels bildet die „Tunica reti similis“ die Netzhaut des Auges- die Retina. Die Augenlinse ist in der Mitte des Auges durch den „Humor crystallinus“ dargestellt (Abb. 2.12).

Die Übersetzung von Alhazens Werk durch Risner [52] enthält auch die optischen Betrachtungen Witelos⁴², der bereits in seiner Handschrift „Opticae Thesaurus“ aus dem 13. Jhd. den Aufbau des Auges skizziert [53]. In einer gedruckten Ausgabe von 1535 ist diese Zeichnung wiedergegeben (Abb. 2.13).

Aus den Betrachtungen Hunains, Alhazens und Witelos wird klar, dass eine präzise Kenntnis zum inneren Aufbau des menschlichen Auges sich nur mit den Mitteln der Anatomie bewerkstelligen lässt.

Die Schriften Galens auf Basis tierischer Anatomie waren noch im 16. Jahrhundert medizinischer Lehrstoff. Die Abweichung der Anatomie des Galen von der tatsächlichen Beschaffenheit des menschlichen Körpers wurden jedoch mit zunehmender Verbreitung der Anatomie offensichtlich und schließlich durch Vesalius in seinem Monumentalwerk „Sieben Bücher über den Aufbau des menschlichen Körpers“ (De humani corporis fabrica libri septem) [55] öffentlich gemacht. In diesem Buch ist auch der Aufbau des Auges als Instrument des Sehens illustriert (Abb. 2.14). Vesalius gilt als Begründer der neuzeitlichen Anatomie. Mit Vesalius gewann die Anatomie an öffentlicher Anerkennung und „anatomische Theater“ wurden an medizinischen Lehranstalten zu einer Selbstverständlichkeit.

Davon profitierte auch der Schweizer Mediziner Platter. Dieser führte seit 1559 zum Teil öffentliche Sektionen durch [56] und erwarb so ein großes Wissen über den menschlichen Körper, welches er anschließend in Analogie zu Vesalius dem reich bebilderten Anatomiebuch „Über die Struktur des menschlichen Körpers“ (De corporis humani structura) [57] veröffentlichte. Von den zahlreichen Illustrationen sind hier besonders die Abbildungen des Auges interessant, die nicht nur den anatomischen Aufbau des Auges

³⁷Arab. „Kitab al-Manazir“, lat. „De Aspectibus“ bzw. „Perspectiva“.

³⁸Hornhaut.

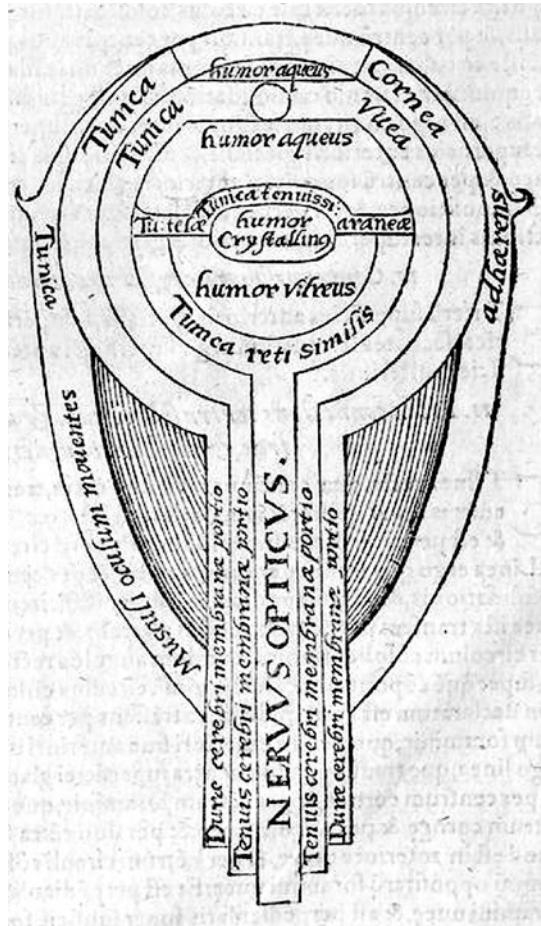
³⁹Mittlere Augenhaut.

⁴⁰Auch humor aquosus (Kammerwasser).

⁴¹Glaskörperflüssigkeit.

⁴²Risner nennt Witelo im Titel von Alhazens „Opticae thesaurus“ auch „Thuringopoloni [52]“, was auf eigene Benennung Witelos als „filius thuringorum et polonorum“ (Sohn der Thüringer und der Polen) zurückgeht [53].

Abb. 2.12 „In totius oculi...“, nach Alhazen, Friedrich Risner (1572), aus [52], S. 6



bis ins Detail zeigen, sondern auch einen anatomischen Querschnitt durch das Auge liefern (Figur 1 in Abb. 2.15).

Platter hatte nebenher als Augenarzt gewirkt und sich dabei u. a. auch mit der Behandlung des grauen Stars beschäftigt [58]. Im seinem Praxishandbuch für Mediziner [59] ist das Kapitel „de Visus Laesione“ der Beschreibung und Behandlung von Augenkrankheiten gewidmet.

Der Ingolstädter Astronom Scheiner beschrieb 1619 in seinem Werk „Oculus“ [60] das Auge nicht nur bezüglich seines Aufbaus, sondern besonders hinsichtlich der Funktion. Eine Zeichnung gibt den vollständigen Aufbau eines Auges im Schnitt wieder (s. Abb. 2.16), eine weitere die optische Abbildung auf der Netzhaut des Auges (Abb. 2.17).

In der „Rosa ursina“ [61] hatte Scheiner seine Erkenntnisse und Gerätschaften zur Beobachtung der Sonnenflecken vorgestellt. Beachtlich ist seine Kenntnis der optischen

Abb. 2.13 Oculus, ex tribus humoribus, Georg Tannstetter und Peter Apian 1535 (aus [54], Liber Tertius S. 55) nach Witelo ([53], 56v) vor 1280

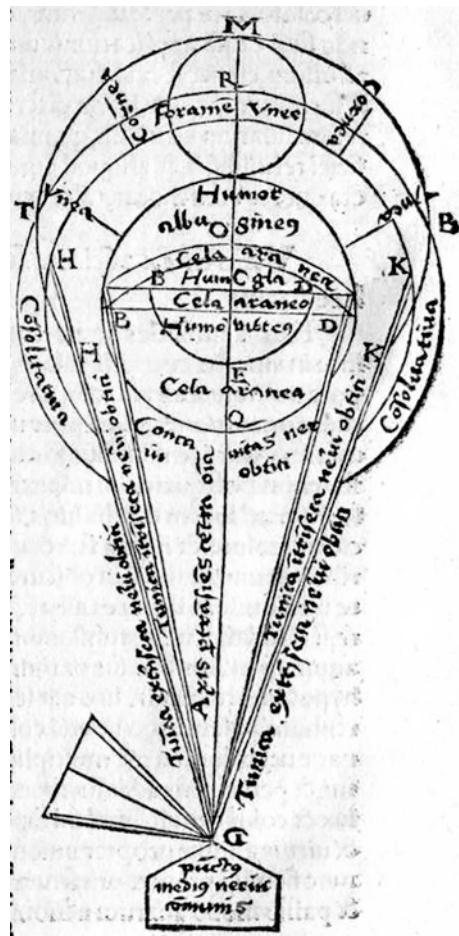
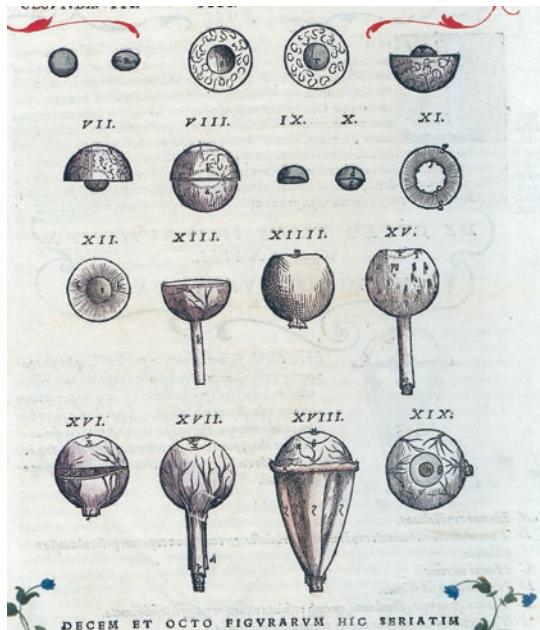


Abbildung sowie die präzise Wiedergabe der Erkenntnisse. Scheiner vergleicht die Wirkungsweise eines Auges mit der einer Camera obscura. Das ist für sich genommen noch nicht bemerkenswert, doch Scheiner hat den Querschnitt des Auges realistisch dargestellt und sogar mit verschiedenen Vorsatzlinsen kombiniert (Abb. 2.18).

In der Abbildung wird jeweils die Bildlage anhand des natürlichen Sehens (Natura) und der künstlichen Darstellung (Presentatio) gegenübergestellt. Durch geeignete Linsenwahl gelingt es Scheiner ganz nach Bedarf ein aufrechtes Bild (Visio recta) oder dessen Umkehr (Visio versa) zu erzeugen. Die Figur 4 der Abb. 2.18 zeigt das, was uns heute als Galileisches Fernrohr bekannt ist: Eine Sammellinse als Objektiv mit einer Zerstreuungslinse als Okular zur Erzeugung eines aufrechten Bildes.

Huygens erklärt in der „Dioptrica“ [62] den Aufbau des Auges und die optischen Verhältnisse an einem reduzierten Auge. Dieses hat nur eine einzige brechende Fläche, die

Abb. 2.14 De Oculo Visus
Instrumento, Andreas Vesalius
(1543) aus [55], S. 644



in der Illustration durch den oberen kleinen Halbkreis dargestellt wird. Die Verengung AC stellt die Pupille dar, der größere untere Halbkreis bildet den Augapfel mit der Netzhaut. Mit diesem einfachen Konstrukt kann Huygens die Brechung und die Abbildung im Auge begreiflich machen. Wenn der große Halbkreis dreimal so groß ist, wie der kleine und das innere des Gebildes mit Wasser gefüllt ist, funktioniert Huygens recht vernünftig (s. Abb. 2.19).

Huygens stellte dem Aufbau seines reduzierten Auges, dem Querschnitt eines naturgetreueren Auges gegenüber (Abb. 2.20), an dem die unterschiedlichen, an der Abbildung beteiligten Komponenten nun deutlich und in Funktion zu sehen sind.

Scheiners und Huygens Darstellungen zeichneten sich durch eine große Klarheit und Vereinfachung in der Darstellung aus und förderten sicherlich das Interesse am Aufbau und der Funktion des menschlichen Auges. Im 17. und 18. Jahrhundert wurde nicht nur die Beschäftigung mit der Anatomie ‚on vogue‘ sondern auch der Besitz eleganter anatomischer Modelle aus wertvollen Materialien. Ein schönes Beispiel ist dazu das Kunstauge des Optikers Muth, der seinem Werk einen zwar umständlichen, aber doch glatt beschreibenden Titel gibt [63]:

„Zergliederung des menschlichen Auges, wie auch eine genaue Darstellung aller desselben Theile woselbst alles accurat vorgebildet, und durch Kunst verfertiget, bestehend aus Horn, Helffenbein, Crystall und Glas. Wodurch die gantze Anatomie des Auges auf das allergenaueste mit denen Musculis, tunicis & humoribus auf gantz angenehme Weise zergliedert und dargestellet werden kann.“

Abb. 2.15 Tabula XLIX
Oculus, Felix Platter (1583),
aus [57], S. 49

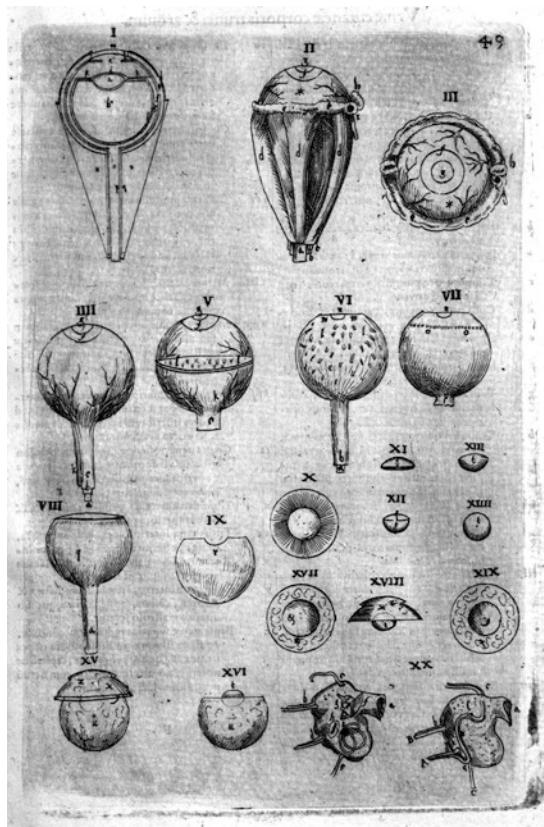


Abb. 2.16 Oculi per axem
et nervum opticum, Christoph
Scheiner (1619), aus [60],
Liber Primus, S. 17

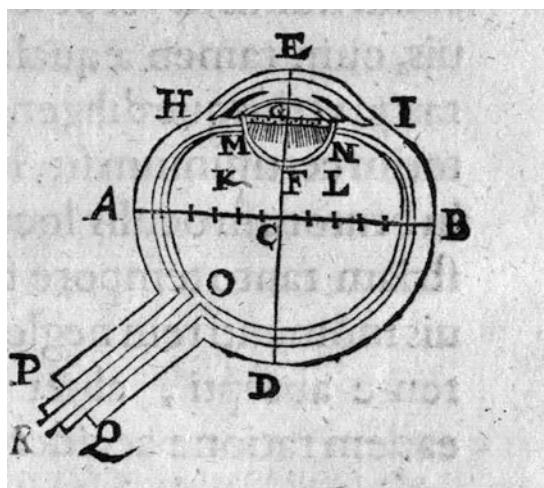
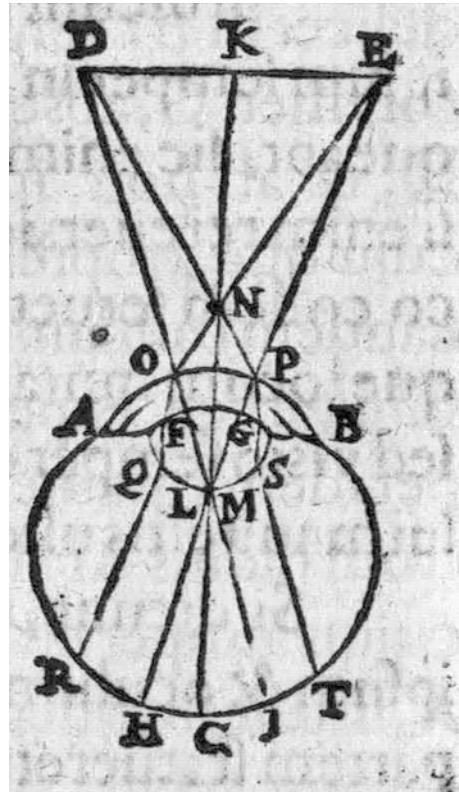


Abb. 2.17 Vera difficultatis caussa redditur (Die wahre Ursache der Bildumkehr.), Christoph Scheiner (1619), aus [60], Liber Tertius, S. 112



Muths Bausatz des Auges datiert mit der frühesten Ausgabe seines Heftchens auf 1709, nur wenige Jahre, nachdem Huygens nachgelassenen Manuskripte als ‚Opuscula Posthuma‘ veröffentlicht wurden.

Eine vernünftige Berechnung der Abbildung muss aber auch die Formen und Brechzahlen der verschiedenen Schichten und Flüssigkeiten berücksichtigen.

Daher schlug Listing 1845 eine optische Definition vor, die nun auf drei einzelnen Medien beruht, die von sphärischen Flächen begrenzt werden (aus [64], S. 56–57).

„Der menschliche Sehapparat kann ... einem System von drei verschieden stark brechenden Mitteln verglichen werden, ...“

Das erste Mittel ... wird gebildet von der wäßrigen Feuchtigkeit nebst der Hornhaut, das zweite ... von der Krystalllinse sammt ihrer Kapsel, und das dritte ... von der Glasfeuchtigkeit.“

In diesem vereinfachten System des „schematischen oder sogenannten ‚mittleren‘ Auges“ werden von Listing Angaben zu Krümmungsradien, Abständen und Brechzahlen gemacht, die in diesem Beitrag der Veranschaulichung dienen.

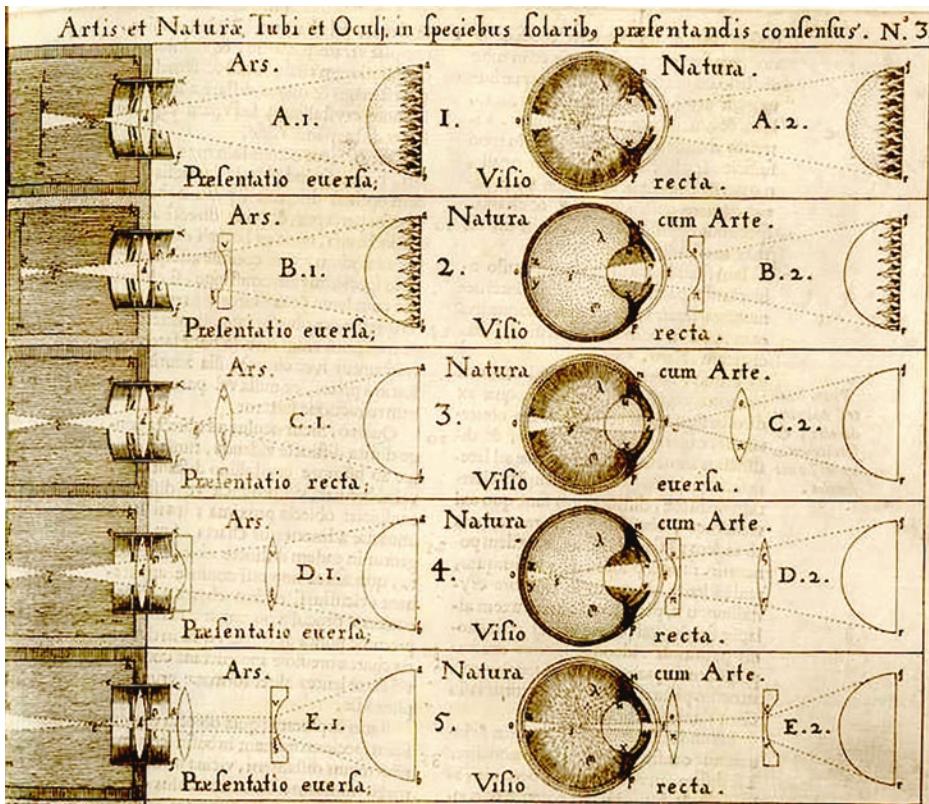


Abb. 2.18 Tubi et Oculi, Christoph Scheiner, 1630 (aus [61], S. 107)

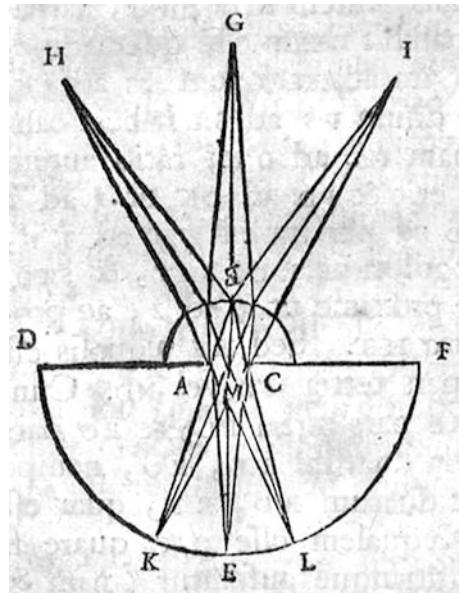
Der Physiologe und Physiker Helmholtz hatte sich mit der Vorarbeit Listings auseinandergesetzt und sich dabei Listings schematisches Auge zu eigen gemacht⁴³. Helmholtz prüfte Listings Angaben und bestätigte die grundsätzliche Richtigkeit des Schemas. Die von Listing und Helmholtz verwendete Bezeichnung des „schematischen und reduzierten Auges“ hat die Zeiten überdauert und wird noch in aktuellen Lehrbüchern⁴⁴ verwendet.

Der Aufbau in grundlegender Funktion wurde bei Helmholtz nach Listings vereinfachtem System aus drei verschiedenen optischen Elementen zusammengesetzt. Die Elemente sind 1. die wässrige Feuchtigkeit (vordere Augenkammer), 2. die Kristalllinse und 3. der Glaskörper (s. Abb. 2.21).

⁴³Helmholtz' „Handbuch der physiologischen Optik“ [65] war jahrzehntelang das Standardwerk der Augenoptik.

⁴⁴Z. B. im aktuellen Lehrbuch „Physiologie des Menschen“ [66] (31. Auflage).

Abb. 2.19 Huygens reduziertes Auge, Christiaan Huygens (1703) aus [62], S. 112



Der Physiologe Gullstrand war nicht nur ein Herausgeber von Helmholtz' „Handbuch der Physiologischen Optik“, sondern hat in diesem Werk selbst zur „Dioptrik des Auges“ beigetragen. Hier stellt Gullstrand u. a. die optischen Werte des schematischen Auges dar (s. [67], S. 300–303) und etabliert mit diesen Werten das „Gullstrand-Auge“. Gullstrands Werte werden noch heute als Referenz zur Berechnung von Brillengläsern⁴⁵ und zur Bestimmung der Brechkraft der Hornhaut des Auges⁴⁶ herangezogen. Obgleich es nun zwischenzeitlich eine große Anzahl von Augenmodellen gibt,⁴⁷ ist das Gullstrand-Auge aufgrund der Einfachheit doch sicherlich das bekannteste.

Vom Sezieren eines Auges

Herophilos gilt nach der Überlieferung als der berühmteste Arzt des Hellenismus. Es wird angenommen, Ptolemaios I. gestattete ihm und dem griechischen Anatomen Erasistratos die systematische Lebend-Sezierung⁴⁸ verurteilter Krimineller in Alexandria. Die maßgebliche Quelle dafür ist Celsus, der allerdings erst mehr als zwei Jahrhunderte nach Herophilos und Erasistratos Tod geboren wurde. Celsus war der Meinung, dass es unbedingt notwendig sei, lebende Körper zu öffnen und lobte die beiden Mediziner für ihren Erkenntnis- und Tatendrang (aus [75], S. 24):

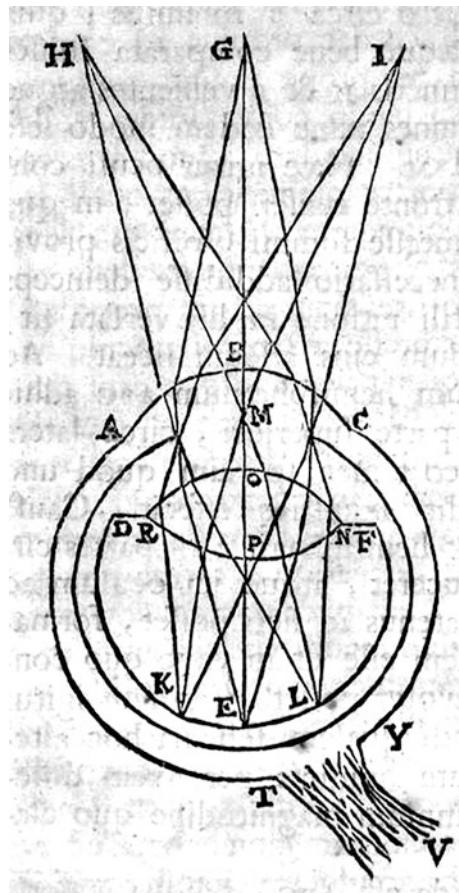
⁴⁵z. B. im Augenoptiker-Lehrbuch „Auge – Brille – Refraktion“ [68].

⁴⁶z. B. zur Berechnung des notwendigen Abtrags beim Augenlasern [69].

⁴⁷z. B. Lotmar [70] (Augenmodell mit Asphären), Kooijman [71] (Weitwinkel-Auge), Liou und Brennan [72] (anatomisch korrektes Auge) oder Navarro [73] (normalsichtiges alterndes Auge). Eine schöne Übersicht zu verschiedenen optischen Augenmodellen liefern Atchison und Thibos [74].

⁴⁸Vivisektionen.

Abb. 2.20 Huygens
realistisches Auge, Christiaan
Huygens (1703) aus [62],
S. 114



„Ganz vorzüglich hätten daher Herophilus und Erasistratus gehandelt, indem sie Verbrecher, welche Sie von Königen aus den Gefängnissen empfingen, lebend öffneten und so, während sogar das Atmen noch fortbestand, die Teile betrachteten, welche die Natur vorher dem Auge entzogen hatte...“⁴⁹

Der byzantinische Mediziner Aëtios erwähnte in seinen umfangreichen 16bändigem Traktat über die gesamte Medizin [78] auch ein spezielles Werk des Herophilos über das Auge. Dieses Werk hat ebenso wie die zahlreichen Zerlegungen lebender und toter Menschen Eingang in die Schriften späterer Mediziner gefunden, auch wenn die Werke selbst nicht erhalten sind.

⁴⁹Im lat. Original „...longeque optime fecisse Herophilum et Erasistratum, qui nocentes homines, a regibus ex carcere acceptos, vivos inciderint, considerarintque, etiamnum spiritu remanente, ea, quae natura ante clausisset, ...“ aus [76] (S. 4–5), der Text der Handschrift von 1465 (s. a. [77], S. 3) weicht davon etwas ab.

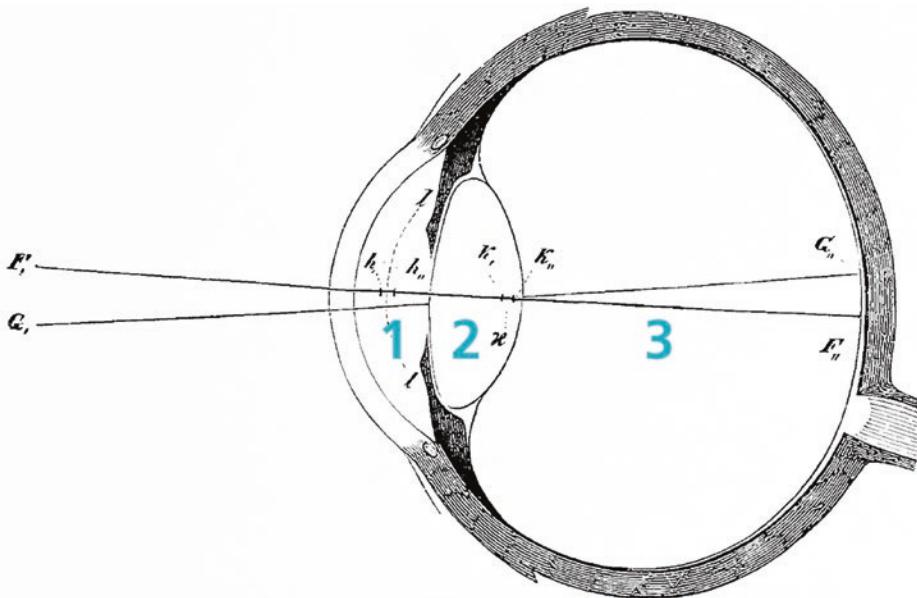


Abb. 2.21 Schematisches und reduziertes Auge nach Listing, Hermann v. Helmholtz (1867), aus [67], S. 77, Fig. 44

Einen Großteil der Kenntnis vom anatomischen Aufbau des Auges verdankten die Gelehrten des frühen Mittelalters dem bereits erwähnten griechisch-römischen Arzt Galen. Dieser nahm die (angeblich) hellenistische Tradition der Vivisektionen wieder auf, musste sich aber mit Affen, Ziegen oder Schweinen begnügen. Er zerlegte nicht nur diese armen Tiere bei lebendigem Leib bis ins letzte Detail⁵⁰, sondern sezerte auch die einzelnen Organe und sogar die Augen. Galen beschrieb dabei jeden Schritt so detailliert und plastisch, dass seine Ausführungen für viele Jahrhunderte das Maß der Anatomie blieben.

Es besteht kein Zweifel daran, dass auch da Vinci, der kurz nach der Geburt des Vesalius gestorben war⁵¹, einige⁵² seiner Zeitgenossen seziert hat, um seine Kenntnisse zur menschlichen Anatomie zu verfeinern. In seinen anatomischen Zeichnungen der Manuskripte A, B und C [80] finden sich erstaunliche Einsichten in das Innere des Menschen. Beim Sezieren des Auges ergab sich beim Durchschneiden des Glaskörpers⁵³ jedoch auch für da Vinci ein Problem. Der Glaskörper enthält eine Flüssigkeit⁵⁴, die beim Aufschneiden natürlich herausläuft. Da Vinci liefert auch für dieses Problem eine „praktische“ Lösung ([79], S. 153):

⁵⁰Die Zerlegungen wurden am lebenden Tier durchgeführt, um die Reaktionen und Funktionen zu beobachten.

⁵¹... und demzufolge keine Kenntnisse der modernen Anatomie haben konnte.

⁵²„... mehr als dreißig Männer und Frauen jeden Alters“ [79], S. 357.

⁵³Der Glaskörper (Corpus vitreum) definiert die Form des Auges.

⁵⁴Der Glaskörpers ist vollständig mit einer wässrigen Flüssigkeit (Humor vitreus) gefüllt, die tatsächlich hauptsächlich aus Wasser besteht.

„Bei der Anatomie des Auges, um das Innere gut sehen zu können, ohne seinen wässrigen Körpersaft zu verschütten, sollten Sie das ganze Auge in Eiweiß legen und es zum Kochen bringen und fest werden lassen; und dann schneiden Sie das Ei und das Auge quer, so dass kein Teil des mittleren Stücks ausfließen kann.“

Helmholtz verglich später das Auge ebenso wie da Vinci mit einer Camera obscura und legte für den Nachweis Hand an einige „frisch ausgeschnitten“ Augen (aus [65], S. 64):

„Das Auge verhält sich gegen das Licht im Wesentlichen wie eine Camera obscura. ... man kann es an frisch ausgeschnittenen Augen sichtbar machen, wenn man vorsichtig den hinteren mittleren Theil ... entfernt ... und nun die Hornhaut eines so präparierten Auges gegen helle Gegenstände kehrt.“

Abschließend ist hier der vollständige Aufbau des Auges im Querschnitt dargestellt, so wie er uns heute geläufig ist. In diesem Augenmodell (Abb. 2.22) sind nun alle an der Abbildung beteiligten optischen Medien und Grenzflächen dargestellt.

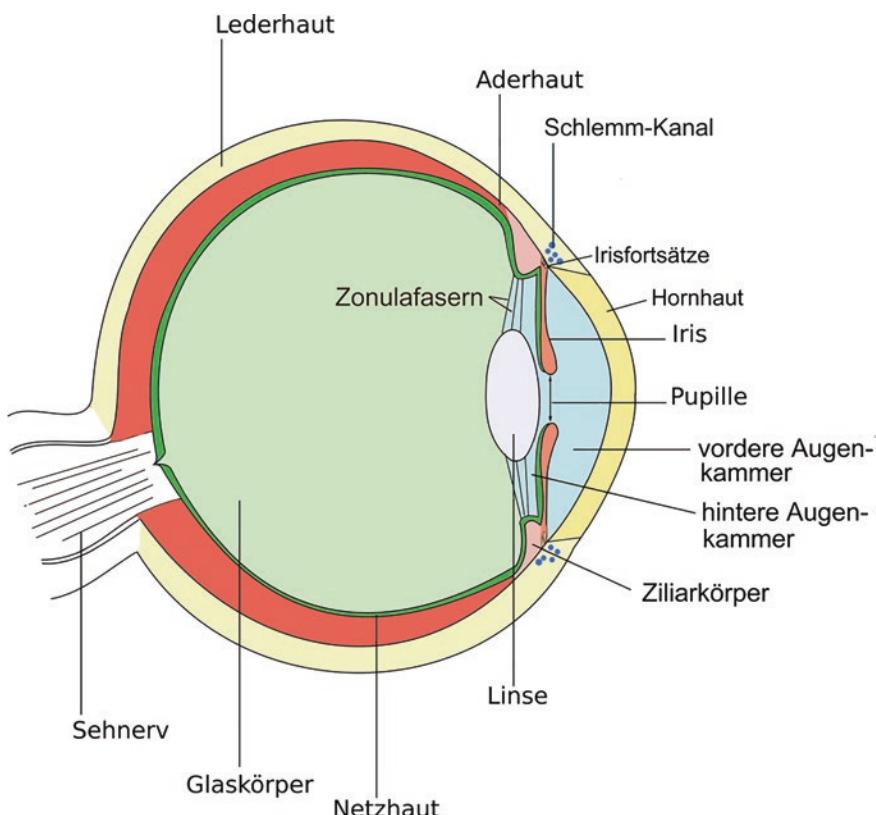


Abb. 2.22 Anatomie des Auges, Joël Gubler „Talos“ (2005), Wikimedia Commons

2.2 Paleo-VR

Von der virtuellen Realität in der Steinzeit

Der aufrechte Gang und die Entwicklung der handwerklichen Fähigkeiten der urgeschichtlichen Menschen und die zunehmende Erkenntnis der Umwelt haben bereits in der Steinzeit zu den ersten Versuchen einer möglichst realitätsnahen Wiedergabe des eigenen Lebensumfeldes geführt. Unser gegenwärtiges Bild über diese Epoche ist wesentlich durch die wenigen plastischen Figuren geprägt, die die Jahrtausende überdauert haben.

Das Streben nach wirklichkeitsnaher Wiedergabe der näheren Umgebung ist spätestens seit der Altsteinzeit ein handgreiflicher Antrieb künstlerischer Beschäftigung. Die in einer Höhle im Achtal bei Schelklingen entdeckte „Venus vom Hohlefels“ zeigt unmissverständlich die Merkmale einer Frau. Der Tübinger Professor Conard, der die Figur entdeckt hatte [81], stellte unlängst diese kleine Plastik gemeinsam mit anderen Mammutfuß-Schnitzereien in seinem Buch „Als der Mensch die Kunst erfand“ [82] in einen direkten Zusammenhang mit den Anfängen der Kunst. Mittlerweile (seit 2017) sind die Höhlen- und die Eiszeit-Kunst in der schwäbischen Jura als Unesco-Weltkulturerbe anerkannt [83]. Die Figur kann im Original in Blaubeuren im dortigen urgeschichtlichen Museum bewundert werden [84], steht aber auch mit anderen 3D-Scans verschiedener eiszeitlicher Figuren und den jeweiligen Fund-Höhlen (zur Scan-Technik s. [85]) als 3D-Modell zur Verfügung [86].

Zur Illustration der Scan-Qualität wurden die 3D-Modelle der Venus und der Halle der Höhle „Hohle Fels“ gerendert und in einem Gesamtbild zusammengestellt (s. Abb. 2.23).

Dass diese Figur, angefertigt vor etwa 40.000 Jahren, kein absonderlicher Einzelfall ist, beweist unter anderem auch die Auffindung der „Venus von Willendorf“ deren höhere Qualität augenscheinlich ist, möglicherweise auf das jüngere Datum (ca. 25.000 Jahre⁵⁵) zurückgeführt werden kann [89].

Zu dieser Figur existieren 3D-Scans bzw. 3D-Modelle, so dass sich eine Gegenüberstellung des realen Kunstwerkes mit einer virtuellen Nachbildung anbietet (Abb. 2.24). Das 3D-Modell ist hier für den 3D-Druck optimiert und dadurch etwas einfacher gestaltet.

Die Abbildung ganzer Szenen auf Höhlenwänden stellt bereits eine Projektion der dreidimensionalen Umgebung auf eine zweidimensionale Fläche dar und zeugt von einem hohen Abstraktionsvermögen. Diese Wandmalereien finden sich nicht nur in Europa, sondern auch in Afrika und sogar in Amerika.

⁵⁵Das Naturhistorische Museum in Wien, in dem die Venus aufbewahrt wird, gibt eine ältere Datierung an [87]. Als Grundlage dieser neueren Altersbestimmung diente hier die Re-Kalibration der Radiokarbonatierung für das Willendorfer Lössprofil [88], in dem die Figur gefunden wurde.



Abb. 2.23 Die Venus im Hohle Fels, Collage aus 3D-Modellen [86], Grasnick (2018)

Die Schattenrisse verschiedener Hände in den Steinzeithöhlen von El Castillo⁵⁶ oder La Garma⁵⁷ sind für sich genommen noch keine künstlerische Meisterleistung. Und doch stellen diese als Handnegative bekannten Abbildungen eine so genaue Kopie der Hand dar, dass noch nach 37.000 Jahren feststellbar ob die abgebildete Hand zu einem Mann oder einer Frau gehörte. Snow ermittelt auf einer Basis von 32 Handabdrücken ein überraschendes Ergebnis: 75 % der Handnegative sind weiblich [91]. In seiner Analyse „New views on old hands“ [92] kommt auch Pettitt zu der Erkenntnis, dass zumeist Frauenhände dargestellt wurden.

Natürlich beschränkte sich die Kunst nicht auf die Abbildung von Körperteilen. In anderen Höhlen von Chauvet finden sich Handnegative, jedoch auch deutlich aufwendigere Zeichnungen.

⁵⁶El-Castillo-Höhle bei Puente Viesgo in Kantabrien, Spanien, entdeckt 1903.

⁵⁷La Garma Höhlenkomplex bei Omoño, Kantabrien, Spanien, entdeckt 1995.

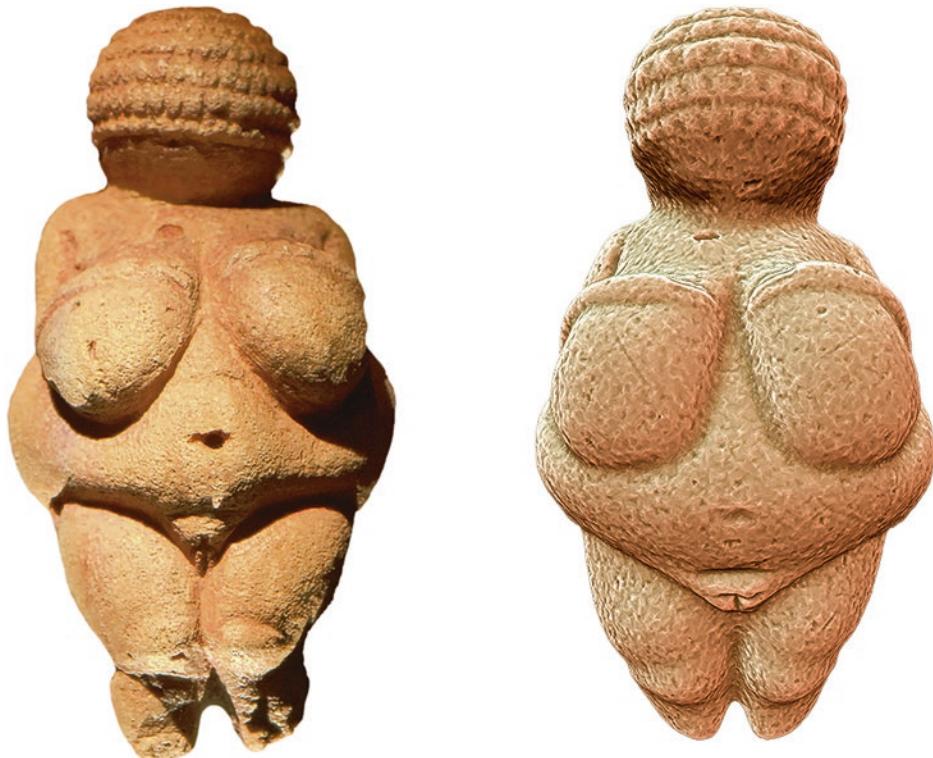


Abb. 2.24 Venus von Willendorf: Links Fotografie Matthias Kabel (2007) Wikimedia Commons, Rechts 3D-Modell „Scan the World“ (2015) [90]

Man ordnet heute derartige Höhlenmalerei verschiedenen Stilen zu. Verbreitet ist eine Einteilung in vier Kunststile nach Leroi-Gourhan [93]. Die Unterteilung ist naturgemäß nicht trennscharf, die Zeiteinteilung ist grob, erlaubt aber dennoch eine gewisse Datierung aufgefunderter Artefakte anhand der Stilistik (s. Tab. 2.1).

Jean Clottes fasst die künstlerischen Leistungen der Frühmenschen im Artikel „Kunst im Morgenlicht der Menschheit“ so zusammen [94]:

„Tatsächlich konnten die Menschen der ausgehenden Altsteinzeit aber offenbar schon perspektivisch zeichnen, kannten verschiedene Maltechniken und vermochten, das Verhalten von Tieren naturgetreu wiederzugeben.“

Tab. 2.1 Kunststile der Höhlenmalerei nach Leroi-Gourhan

	Art	Beginn		Ende	
Stil I	Primitive Periode, Ritz-zeichnungen	ca. 30.000 v. Chr.	Aurignacien	ca. 23.000 v. Chr.	Gravettien
Stil II	Phase der stilisierten Darstellung in Malerei und Plastik (Venus)	ca. 23.000 v. Chr.	Spätes Gravettien	ca. 17.000 v. Chr.	Solutréen
Stil III	Perspektivische Darstellung von Szenen	ca. 17.000 v. Chr.	Spätes Solutréen	ca. 13.000 v. Chr.	Magdalénien
Stil IV	Realistische Darstellung von Gestalt und Bewegung	ca. 13.000–11.000 v. Chr.	Mittleres Magdalénien	ca. 10.000–8.000 v. Chr.	Spätes Magdalénien

2.3 Historische Sehtheorien

Vom realen Objekt zu dessen Wahrnehmung

Das Auge ist unbestritten eine außerordentlich erstaunliche Entwicklung der Evolution und ermöglicht dem Menschen einen Großteil der Wahrnehmung. Auch, wenn das menschliche Auge gegenüber den einfachsten Uraugen eine im darwinistischen Sinne eine eigentlich „unerreichbare Vorrichtung“ darstellt, ist die Qualität der Abbildung doch eingeschränkt. Ein natürliches Auge weist keine präzisen Abmessungen auf. Die äußere Gestalt von Hornhaut, Glaskörper und Linse folgt keiner vollkommenen mathematischen Kurve, die brechenden Medien sind inhomogen und die Lage der optischen Flächen zueinander ist für eine perfekte Bilderzeugung nicht ideal. Die durch diese Imperfektion verursachten Farb- und Bildfehler werden zusätzlich noch durch Streuung und innere Reflexion im Auge verschlechtert. Auf der Netzhaut gibt es Bereiche, in denen keine Nervenzellen liegen und somit überhaupt kein Bild aufgezeichnet wird. Trotzdem sieht man ein brillantes und hochauflösendes Bild. Das zeigt, dass Sehen mehr ist, als die Folge von Brechungen an unterschiedlichen Medien.

Hermann von Helmholtz beschrieb 1871 in einem Aufsatz „Der optische Apparat des Auges“ die zahlreichen Abbildungsfehler und Einschränkungen des Auges und kam zu dem Schluss ([95], S. 21):

„Nun ist es nicht zuviel gesagt, dass ich einem Optiker gegenüber, der mir ein Instrument verkaufen wollte, welches die letztgenannten Fehler hätte, mich vollkommen berechtigt glauben würde, die härtesten Ausdrücke über die Nachlässigkeit seiner Arbeit zu gebrauchen, und ihm sein Instrument mit Protest zurückzugeben.“

In Bezug auf meine Augen werde ich freilich letzteres nicht thun, sondern im Gegenteil froh sein, sie mit ihren Fehlern möglichst lange behalten zu dürfen. Aber der Umstand, dass sie mir trotz ihrer Fehler unersetzlich sind, verringert offenbar, wenn wir uns einmal auf den freilich einseitigen aber berechtigten Standpunkt des Optikers stellen, doch die Grösse dieser Fehler nicht.“

Es zeigt sich schon bei dieser einfachen Betrachtung, dass sich der Sehvorgang nicht auf die optische Abbildung reduzieren lässt. Hier findet der Übergang von der Abbildung zur Wahrnehmung statt, die im visuellen Bereich auch bei Helmholtz die „Gesichtswahrnehmung“ ist ([95], S. 98):

„Die Uebereinstimmung zwischen den Gesichtswahrnehmungen und der Aussenwelt beruht also ganz oder wenigstens der Hauptsache nach auf demselben Grunde, auf dem alle unsere Kenntniß der wirklichen Welt beruht, nämlich auf der Erfahrung und der fort dauernden Prüfung ihrer Richtigkeit mittels des Experiments, wie wir es bei jeder Bewegung unseres Körpers vollziehen.“

Was also ist das Sehen wirklich?

Die Geschichte der Erkenntnistheorie beginnt gewöhnlich mit den Sieben Weisen von Griechenland. Platon bezeichnet diese Weisen im Dialog des Sokrates mit Protagoras als eine Gruppe von „Alten“⁵⁸, die in der Kunst des Lakonisierens⁵⁹ vollkommen unterrichtet waren. Aber schon Platon beschreibt die Belehrung des Solon, einem der sieben Weisen, durch einen „sehr bejahrten“ ägyptischen Priester, der Solon auf die junge Geschichte der Griechen im Vergleich zu den Ägyptern hinweist (aus [97], S. 13):

„O Solon, Solon, Ihr Hellenen bleibt doch immer Kinder, einen alten Hellenen giebt es nicht. ... Ihr seid alle jung am Geiste; denn Ihr bewahrt in demselben weder eine wegen uralter Überlieferung schon alte Ansicht, noch irgend eine durch Zeit ergraute Kenntnis.“

Der betagte Priester weist im Folgenden auf die uralten Aufzeichnungen in den ägyptischen Tempeln hin und erzählt Solon schließlich von der Insel Atlantis. Obgleich die letzte Aussage des Priesters ihn als Zeugen insgesamt kaum glaubhaft erscheinen lässt, hat er mit seinem Eingangsstatement doch recht.

⁵⁸ „....Thales von Miletos, Pittakos von Mytilene, Bias von Priene, unser Solon, Kleobulos von Lindos, Myson von Chenä, und als der siebente wurde zu diesen gezählt der Lakedaimonier Chilon.“ (aus [96], S. 288)

⁵⁹ Mit „Lakonisieren“ oder „lakonischer Kurzrednerei“ beschreibt Platon die treffsichere, sprachliche Knappheit der Lakedaimonier (Spartaner) bei der Formulierung kurzer denkwürdiger (weiser) Sprüche.

Der Papyrus Ebers⁶⁰ aus der Zeit des Pharaos Amosis ist eines der zweiundvierzig hermetischen Bücher⁶¹, die vom ägyptischen Gott Thot (griech. Hermes) inspiriert sein sollen. Ebers selbst fühlte sich berechtigt, die kommentierte Schriftrolle „Das hermetische Buch über die Arzneimittel der alten Ägypter“ zu nennen [99]. In dem Papier findet sich auch „Das Buch von den Augen“, in dem zahlreiche Arzneien⁶² zur Linderung von Augenleiden beschrieben werden. Einige dieser Mittel sind durchaus zur Linderung der Beschwerden geeignet und wurden noch im 19. Jahrhundert verwendet, wie Hirschberg in der „Geschichte der Augenheilkunde“ [101] erläutert⁶³. Die im Buch der Augen empfohlene Verwendung von Krokodilskot⁶⁴ in der Augensalbe hat sich dagegen glücklicherweise nicht durchgesetzt⁶⁵.

Das Auge war im alten Ägypten ein wichtiges Symbol. Von besonderer Bedeutung waren dabei die Augen des Sonnengottes Re (oder auch Ra). Re ist das Kind der „Mehet-weret⁶⁶“, des allesumfassenden und sternetragenden Himmelozceans, der dem Urgewässer entstiegen ist. Die „Mehet-weret“ als Herrin des Himmels und Mutter der Sonne wurde als himmlische Nährmutter aufgefasst und ganz selbstverständlich als Kuh dargestellt. Die himmelsumspannende Ur-Kuh gebiert täglich ihren Sohn Re als Sonne und trägt diesen zwischen den Hörnern. Die ägyptische Göttersage von der Himmelskuh ist aus den Gräbern der Pharaonen Tutanchamun, Sethos I., Ramses II. und Ramses III. überliefert und als „Buch der Himmelkuh“ bekannt [105]. Die Augen des Sonnengottes haben in der Mythologie eine besondere Bedeutung. Die Menschen sind aus den Tränen des Sonnengottes entstanden, sein Blick kann sie vernichten. Im Buch der Himmelkuh findet sich die Klage des Re und ein Vorschlag zur Bestrafung der Menschheit ([105], S. 38).

⁶⁰Benannt nach dem Ägyptologen Ebers, der diesen altägyptischen Papyrus erwarb und als das „Hermetische Buch über die Arzneimittel der alten Ägypter“ kommentiert herausgab [98, 99].

⁶¹Nach Clemens von Alexandria, auch Titus Flavius Clemens, Clemens berichtet in seiner Textsammlung „Stromata“ von 42 Schriften, von denen 36 Bücher die gesamte ägyptische Philosophie enthalten, die restlichen sechs behandeln aber medizinischen Inhalt: Anatomie, Krankheiten, chirurgische Werkzeuge, Arzneien und Frauenkrankheiten ([100], S. 758).

⁶²Fast immer in Verbindung mit Augenschminke und häufig mit einer Beschwörungsformel.

⁶³z. B. die Lidrandsalbe aus schwarzem Spießglanz (*Antimonium crudum*).

⁶⁴Krokodilkot war allerdings lange Zeit eine anerkannte Zutat zu Arzneien, z. B. beschrieben von Plinius dem Älteren im XXVIII. Buch der „Historia naturalis“ ([102], S. 35–36). Widerlicher Höhepunkt der Behandlung mit Exkrementen ist sicherlich die „Heilsame Dreck-Apotheke“ [103] des Arztes Paullini mit zahlreichen, vorgeblich heilsamen Anwendungen von Kot und Urin.

⁶⁵Im antiken medizinischen Alltag wurden auch andere tierische Bestandteile genutzt. Galen verwendete u. a. getrocknete Vipern in dem von ihm beschriebenen Allheilmittel „Theriacus andromachi senioris“ (Theriak nach Andromachus, dem Leibarzt Neros) mit dem Hauptbestandteil Opium, wodurch sich seine allgemein lindernde Wirkung erklärt (Rezeptur aus dem Edinburger Dispensatorium [104], S. 554–555).

⁶⁶Wörtlich: „große Flut“.

„Du ältester Gott, aus dem ich entstanden bin, und ihr Götter und Ahnen – seht, die Menschen, aus meinem Auge entstanden haben Anschläge gegen mich ersonnen!“

„Laß dein Auge dahinziehen, daß es sie dir bloßstelle die sich verschworen haben als Bösewichter. Es gibt kein Auge, das ihm überlegen ist, um sie für dich zu schlagen – möge es herabfahren als Hathor!“

Re übergibt der Göttin Hathor also die Funktion des Sonnenauges, damit diese die Menschen bestrafen kann. Das Sonnenauge in der Person der Hathor tötet damit im Auftrag des Re die Rebellen der Wüste.

Es zeigt sich hier, dass das Auge in diesem Mythos eine aktive Funktion übernimmt und im Prinzip auf Entfernung aktiv wirken kann. Diese Betrachtung bildet die Basis für die frühen Annahmen zur Fernwirkung des Sehens und erhält ebenso wie das Wasser eine Rolle in der Philosophie. Schon die Himmelskuh Meheth-weret erhab sich aus den Wassern des Ur-Ozeans um den Sonnengott Re zu gebären. Das Wasser als der Anfang und das Ende von Allem ist in ein verbreitetes Motiv der Schöpfungsgeschichte und findet sich als Sintflut auf den Tontafeln des Gilgamesch-Epos [106] und im 1. Buch Mose, der „Genesis“ [107].

Aristoteles berichtet, dass auch Thales, ein weiteres Mitglied der „Sieben Weisen“, das Wasser für den Stoff hielt, aus dem sich alles bildet (aus [108], S. 30):

Er kam wahrscheinlich auf diesen Gedanken, weil er sah, dass die Nahrung von Allem feucht ist, und dass selbst das Warme daraus entsteht und davon sich nährt (und das, woraus Alles wird, ist der Anfang); auch sah er, dass der Same aller Dinge feuchter Natur ist, und dass das Wasser der Anfang des Feuchten ist; so kam er zu dieser Annahme.

Das Wasser des Flusses Styx bildete in der griechischen Mythologie die Grenze zwischen der Welt der Lebenden und dem Totenreich Hades. Selbst die Götter schworen im Namen des Wassers, wie Homer im 14. Gesang der Ilias erzählt ([109], S. 49):

„Nun wohl, beschwör’ es bei Styx’ wehdrohenden wassern,
Rührend mit einer hand die nahrungsprossende erde,
Und mit der andern das schimmernde meer; daß alle sie uns nun
Zeugen sein, die um Kronos versammelten unteren götter“

Anaximander, ein Schüler des Thales, erfindet den Urstoff des Kosmos; das Apeiron ([110], S. 13):

„Anfang der Dinge ist das Unendliche [Apeiron⁶⁷]. Woraus aber ihnen die Geburt ist, dahin geht auch ihr Sterben nach der Notwendigkeit. Denn sie zahlen einander Strafe und Buße für ihre Ruchlosigkeit nach der Zeit Ordnung.“

⁶⁷Apeiron, aus griech. peirata (Grenze) und der Negation „a“, meint das Gegenteil der Grenze – das Unbegrenzte, Unbestimmte oder Unendliche.

Die unvergängliche Substanz des Apeiron ist also unbestimbar und dennoch für Leben und Tod verantwortlich. Nietzsche sieht in der Idee des „Unbestimmten als Urstoff“ auch eine kritische Einschätzung des Daseins und hält Anaximander folgerichtig für den ersten philosophischen Pessimisten ([111], S. 275).

Vom Apeiron über den Äther zum Quantenfeld

Ein geheimnisvoller Stoff wie das Apeiron des Anaximander hat den Vorteil, immer den Teil einer Theorie vervollständigen zu können, der sonst unerklärlich bliebe. Zunächst diente den Ägyptern das Wasser und später den Griechen auch die Luft als die ursprünglichen Elemente, aus denen Alles entsteht. Den nachfolgenden Philosophen genügten die konventionellen Mythen und gottgegebenen Modelle hingegen schon zur Beschreibung des Alltäglichen nicht mehr. Die Erklärung der Prozesse zur Wahrnehmung schien nach einem vermittelnden Stoff zu verlangen, der eine Wirkung über große Distanzen überträgt. Solche unbestimmten Substanzen als Hilfsmittel physikalischer Modelle fanden auch in der Wissenschaft renommierte Fürsprecher. Aristoteles beschrieb in seinem Werk „Über den Himmel“⁶⁸ neben den vier Elementen Feuer, Wasser, Erde und Luft noch einen fünften Stoff (lat. Quintessenz), eine immaterielle beseelte Substanz, welche er wie seine Vorgänger den Äther nennt. So findet man z. B. bei Aristoteles in den „Vier Bücher über das Himmelsgebäude und Zwei Bücher über Entstehen und Vergehen“: „...unentstanden und unvergänglich ist er ein Göttliches, welches nicht mit Unrecht von den Früheren als Äther bezeichnet wurde...“ (aus [112], S. 11/12)

Der Äther, nach dem griechischen Wort „aither“ für den oberen Himmel, war in der antiken Mythologie der Sitz der Götter. Platon verwendete den Namen bereits als Bezeichnung für den „...hellsten Theil der Luft...“ (aus [97], S. 64).

Auch Huygens benötigte zur Erklärung der Lichtausbreitung ein Medium, in dem sich die Lichtwellen fortpflanzen können. Huygens verwendete die ätherische Bezeichnung „l’Ether“ an mehreren Stellen seiner „Traité de la lumière“ [113] und bedient sich dabei an Descartes Vorstellung der feinen Stofflichkeit „matière subtile“ (aus [114], in der Übersetzung ganz einfach die „feine Materie“ [115]), mit der nach Descartes ein jeglicher Raum gefüllt sei. Nach Huygens Vorstellung ist es „...der Äther, welcher das Licht vermittelt...“ (aus [116], S. 32).

Lichtwellen können sich in der feinen Materie des Äthers nun genauso gut wie die Wellen im Wasser ausbreiten. Auch Newton verwendete das Äther-Modell, entwickelte aber zunehmend Bedenken zur Natur dieser geheimnisvollen Substanz uns schrieb schließlich im 3. Buch seiner Optik „Denn was dieser Äther ist, weiß ich nicht.“⁶⁹ Einsteins Relativitätstheorie ist eng mit der Abkehr von der damaligen Äthertheorie verknüpft. Während der Ferien von seiner Berner Patentamtstätigkeit hielt Einstein auf der Salzburger Naturforscherversammlung 1909 einen bemerkenswerten Vortrag [118] „Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung“. Darin beginnt Einstein mit Erklärungen zum Welle-Teilchen-Dualismus, der „...Verschmelzung von Undulations- und Emissionstheorie des Lichtes...“ und der Bemerkung „Heute aber müssen wir die Ätherhypothese als einen überwundenen Standpunkt ansehen.“ ([119], S. 817). In der Folge widmete Einstein dem Äther dennoch einige Beiträge⁷⁰ und beharrte schließlich auf der Notwendigkeit eines „mit physikalischen Eigenschaften ausgestatteten Kontinuums“, da seine allgemeine Relativitätstheorie ein unmittelbare Fernwirkung ausschließe

⁶⁸Griech. Peri uranu, lat. De caelo.

⁶⁹Im Original „...for I do not know what this Äther is...“ (aus [117], S. 326)

⁷⁰z. B. „Äther und Relativitätstheorie“ [120] oder „Über den Äther“ [121].

und er schlussfolgerte: „...jede Nahwirkungs-Theorie aber setzt kontinuierliche Felder voraus, also auch die Existenz eines ‚Äthers‘.“ (aus [121], S. 14). Dies begründet sicherlich zum Teil die Ablehnung Einsteins einer unerklärlichen Fernwirkung und die Zweifel an den Unbestimmbarkeiten der Quantentheorie⁷¹. Einstein verwendete viel Energie darauf⁷², dem Physiker Bohr die Unvollständigkeit der Quantentheorie zu nachzuweisen und fragte in einem Aufsatz: „Kann die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Welt vollständig sein?“ [123]. Die Quantenmechanik ist auch für Eingeweihte ein schwer verständliches Terrain. So schrieb der spätere Nobelpreisträger Born in einem Brief an Einstein: „Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei!“. Born hatte später offensichtlich seinen Frieden mit den Quanten gemacht, da er den Nobelpreis für Physik ausdrücklich für seine fundamentalen Forschung in der Quantenmechanik erhielt [124].

Die Verteilung der physikalischen Eigenschaften im Raum erfolgt üblicherweise durch die mathematische Beschreibung als Feld. Alle Elementarteilchen lassen sich seit Planck⁷³ und Einstein⁷⁴ als Quantenobjekte beschreiben, womit sowohl die kleinste Energiemenge des jeweiligen Feldes, als auch die Wechselwirkung gemeint sein kann. Die gesamte uns bekannte Materie besteht aus Quantenobjekten wie Photonen, Elektronen und anderen Elementarteilchen, deren Wechselwirkungen im Raum sich demzufolge als Quantenfeld beschreiben lassen.

Anaximenes, der an die Lehre des Anaximander anknüpft, hält die Luft nicht nur für den Atem des Lebens, sondern auch für das Urelement, aus dem sich die anderen Elemente durch Verdünnung oder Konzentration entstehen. Zwei Fragmente seiner Lehre markieren seine Weltsicht (aus [110], S. 21):

„Wie unsre Seele Luft ist und uns dadurch zusammenhält, so umspannt auch die ganze Weltordnung Odem und Luft.“

„Das sich zusammenziehende und verdichtende der Materie ist das Kalte, das Dünne und Schlaffe dagegen das Warme.“

Anaximenes versucht damit, seine Beobachtungen auf physische Grundlagen zu stellen. Der Überlieferung nach soll Anaximenes ein aufmerksamer Augenzeuge außergewöhnlicher Naturschauspiele (wie Meeresleuchten oder Mondregenbogen) gewesen und man schreibt ihm die Erkenntnis der Reflexion des Sonnenlichtes durch den Mond zu (s. [126], S. 26).

⁷¹Besonders die Heisenbergsche Unschärferelation (zwei komplementäre Eigenschaften sind gleichzeitig nicht genau bestimmbar), die Bohrsche Komplementarität (zwei verschiedene Beobachtungen eines Vorgangs schließen einander aus) und Bornsche Regel (Ein Teilchen befindet sich nicht an einem einzigen Ort, sondern an vielen Orten gleichzeitig).

⁷²Bohr beschreibt in seinen „Diskussionen mit Einstein“ [122] einige dieser Dispute und erwähnt auch Einsteins bildhafte Sprache am Beispiel der „Gespensterfelder“.

⁷³Die Naturkonstante, die Planck 1900 „h“ (aus [125], S. 240) nennt, heißt heute Plancksches Wirkungsquantum.

⁷⁴Einstein beschreibt die Energie eines Lichtquants (das Photon) als Produkt des Planckschen Wirkungsquants und der Frequenz des Lichtes (Einsteinsche Gleichung).

Der Wunsch nach größtmöglichem Erkenntnisgewinn scheint sich in dem Griechen Pythagoras besonders manifestiert zu haben. Heraklit schrieb zu Pythagoras' Sammel-leidenschaft ([110], S. 80):

„Pythagoras, des Mnesarchos Sohn, hat von allen Menschen am meisten sich der Forschung beflissen, und nachdem er sich diese Schriften auserlesen, machte er daraus eigene Weisheit: Vielwisserei, Rabulisterei.“

Dies ist nicht durchweg positiv zu verstehen, denn Rabulisterei meint zunächst nur die Kunst, Recht zu behalten, und ist als Haarspaltereи zu verstehen. Heraklit übersetzt zudem Vielwisserei nicht automatisch mit Klugheit, sondern er meint: „Vielwisserei lehrt nicht Verstand haben. Sonst hätte Hesiod es gelernt und Pythagoras, ferner auch Xenophanes und Hekataios.“ ([110], S. 68)

Pythagoras werden in der Folge verschiedene tiefgründige Einsichten zugeschrieben, von denen der Satz des Pythagoras⁷⁵ sicherlich zu den bekanntesten gehört. Laertius lässt Alexander⁷⁶ über Pythagoras erzählen. Interessant ist seine Sicht auf die Wahrnehmung ([129], S. 106–107):

„Die Wahrnehmung im allgemeinen wie insbesondere das Gesicht [gemeint ist hier das Sehen] sei eine Art besonders warmen Hauches. Daher heißt es von ihm auch, daß es durch die Luft und durch das Wasser gehe. Denn das Warme erfahre einen Gegendruck des Kalten. Wäre nämlich der Hauch der Augen kalt, so würde er von der gleichartigen Luft getrennt bleiben; so aber findet sich gegensätzliche Luft in den Augen, welche er [Pythagoras] Pforten der Sonne nennt.“

Hier findet sich die Vorstellung des Sehens als Widerstreit von Wärme und Kälte, die sich aus der damaligen Vier-Elemente-Weltsicht ergab. Aus dem Apeiron des Anaximander entstehen die vier Elemente Wasser, Luft, Erde und Feuer. Das Auge sendet nach dem Verständnis der Pythagoräer einen feurigen Hauch aus, der beim Auf-treffen des Hauches auf einen kühlen Gegenstand einen fühlbaren Gegendruck erfährt. Das Element des Fühlens stellt das Sehen auf die Ebene des Tastsinns. Wie beim Betasten eines Gegenstandes mit den Händen wird ein Objekt mit dem Feuer des Auges berührt und so ein Seheindruck auch über lange Distanzen vermittelt. Diese Analogie erscheint erklärbar, solange das Licht vom Auge ausgeht.

Tetrakty – Die göttliche Vierheit

Die Vier war den Pythagoreern eine überaus wichtige Zahl. Neben den vier Elementen, aus denen die alten Griechen die gesamte Welt konstruierten, konnten diese Elemente mit nur vier

⁷⁵ „In einem rechtwinkligen Dreieck ist die Summe der Flächen der Quadrate über den Katheten gleich der Fläche des Quadrates über der Hypotenuse“. Allerdings war dieses Grundverhältnis der Dreiecksberechnung schon den Babylonieren bekannt, wie die Tontafel „Plimpton 322“ (aus dem 19.–16 Jhd. v. Chr., also mindestens 1000 Jahre vor Pythagoras) beweist [127].

⁷⁶ Alexander Polyhistor, griech. Gelehrter, „Vielwisser und ein Vielschreiber“ ([128], S. 21).

Eigenschaften, den Primärqualitäten kalt, warm, trocken und feucht beschrieben werden. Die Gruppe der Zahlen von 1 bis 4, die in der Summe 10 ergeben, bezeichneten die Pythagoreer als „Tetrakty“ (Vierheit). Diese vier Zahlen waren nach damaligem Verständnis der Schlüssel zur mathematischen Beschreibung der Welt.

Die Pythagoreer verpflichteten sich in einem Eid die Lehren der Schule des Pythagoras nicht an preiszugeben, wobei Pythagoras dabei als der gepriesen wird, der die Tetrakty entdeckt hatte:

„Gewisslich nicht! Bei Ihm, der unserer Gattung schenkte die Tetrakty...“ ([130] aus S. 243)

Die symbolische Darstellung der Tetrakty erfolgte üblicherweise über die dreiecksförmige Anordnung der Zahlen als einzelne Symbole in Reihen übereinander. Eine solche Dreieckszahl ist auf dem Gemälde „Die Schule von Athen“ des von italienischen Renaissancemalers Raffael dargestellt. Auf einem riesigen Fresko, das sich an einer Wand der „Stanza della Segnatura“ (einem Saal im Vatikan) befindet, wird eine ebenso fiktive wie illustre Versammlung antiker Philosophen u. a. mit Platon, Aristoteles, Sokrates, Ptolemäus und Diogenes dargestellt (Abb. 2.25). An einer Stelle sitzt der schreibende Pythagoras, wobei ihm währenddessen von einem Schüler eine Schiefertafel zugreicht wird. Am unteren Ende der Schiefertafel findet sich die Tetrakty aus römischen Einsen (I) mit der darunter notierten Summe 10 (X, s. Abb. 2.26).



Abb. 2.25 Stanza della Segnatura im Vatikan für Papst Julius II., Wandfresko: Die Schule von Athen, Raffael (1509) aus The Yorck Project (2002)

Abb. 2.26 Pythagoras mit Tetrakty, Ausschnitt aus Abb. 2.25



Das Auge verströmt als ein Licht, welches die Objekte umfasst und so einen Seheindruck erzeugt. Nach der Theorie des Diogenes entwickelt das Bild sich in der Pupille mit dem Geist (der Luft) des Auges aus dem Zusammenspiel von Geist und Bild die Sehempfindung⁷⁷. Diogenes glaubte zudem, dass die Augenfarbe einen erheblichen Einfluss auf die Sehleistung hätte ([132], S. 94).

Nach Theophrast vertrat Anaxagoras den Grundsatz, dass etwas nur dann wahrgenommen werden kann, wenn es sich in der Zusammensetzung von dem des jeweiligen Sinnesorganes (z. B. Auge oder Ohr) unterscheidet, das Ähnliche sei für das Ähnliche unempfindlich. Das Sehen erfolgt durch eine Spiegelung des Gegenstandes in der Pupille, die aber nur dann erfolgt, wenn Auge und Gegenstand ungleichartig in der Farbe wären ([133], S. 350)⁷⁸. Anaxagoras lehrte als unverbesserlicher Materialist die Ansicht, dass die Sonne nur „ein Klumpen Materie von lauter Feuer sey“ ([134], S. 105) und wurde dafür des Gottesfrevels angeklagt und Gefängnis geworfen ([135], S. 300).

⁷⁷Nach Theophrast in der Bearbeitung von Philippson: „At oculos cernere, imagine in pupilla facta, qua cum aëre interno mixta sensum fieri putat.“ (aus [131], S. 117–119)

⁷⁸Nach Theophrast: „Cerni enim representatione pupillae: repraesentari vero non in con coloribus, sed in diversis colore. At multis die, aliis nocte esse discolora (acutius vero cernere)“ (aus [131], S. 109).

Ist Sehen nur heiße Luft?

Es mag auf den ersten Blick verwunderlich erscheinen, dass die Vor-Sokratiker und Pythagoreer wenig vom Einfluss des Lichtes auf den Sehvorgang bemerkt haben sollen, sondern immer wieder vom Feuer sprechen. Das Wesen des Lichtes ist aber bei den Philosophen durch Wärme oder Feuer in Analogie zur Sonne und Luft in der Funktion von Geist und Seele geprägt. Diese Vorstellung ist auch aus heutiger Sicht keineswegs abwegig. In der Antike waren Feuer und Licht untrennbar miteinander verbunden, die Erzeugung eines Lichtes ohne Feuer war völlig undenkbar. Die infrarote Wärmestrahlung ist aber ebenso wie das sichtbare Licht Teil des elektromagnetischen Spektrums und folgt den gleichen Gesetzmäßigkeiten. Der Geist des Gehirns ist ganz gewiss auch heute noch notwendig, um aus der optischen Abbildung des Auges die Sehempfindung zu generieren.

Empedokles erkannte schließlich die Natur des Lichtes. In einem der erhaltenen gebliebenen Fragmente erläutert Empedokles die Natur des Lichtes am Beispiel einer Laterne (aus [110], S. 196–197):

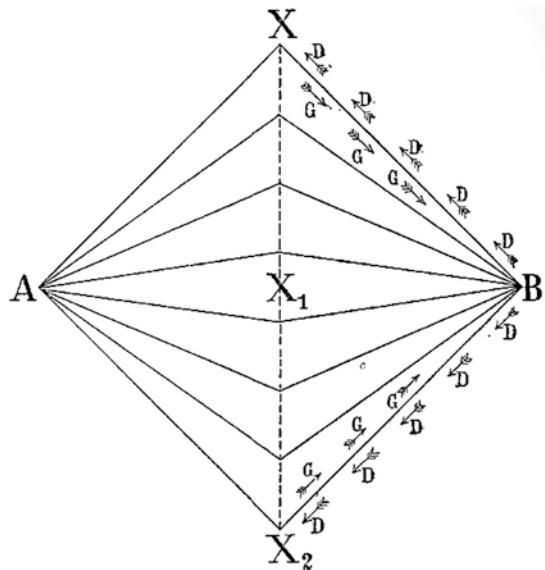
„Wie wenn einer in der Winternacht einen Ausgang vorhat und dazu sich ein Licht rüstet und des brennenden Feuers Glanz entzündet, von allen Seiten vor dem Winde schirmende Laternen; sie zerteilen zwar der blasenden ‚Winde‘ Wehen, doch das Licht drang nach außen durch, weil es soviel feiner war, und leuchtete zum Firmament mit unermatteten Strahlen: so barg sich das urewige Feuer ... hinter der runden Pupille in Häute und dünne Gewänder eingeschlossen, die mit göttlich eingerichteten, gerade hindurch gehenden Poren durchbohrt waren. Diese hielten die Tiefe des ringsum erfloßenen Wassers ab, doch das Feuer ließen sie hinaus, weil es soviel feiner war.“

Auch wenn es nicht unmittelbar ins Auge springt: Empedokles vergleicht in seinem Laternengleichnis die Laterne mit dem Auge. In der Laterne befindet sich das Feuer des Lichtes, das von der Laterne zwar gegen den Wind abgeschirmt wird, aber sich dennoch in Strahlen unermattet und unendlich weit ausbreitet. Im Auge, so vermutet Empedokles, sei von Geburt an ein ebensolches Feuer eingeschlossen, das durch natürlich (göttlich) eingerichtete Poren den Weg nach außen findet, während die Flüssigkeit des Auges durch Häute abgeschirmt zuverlässig im Inneren verbleibt.

Empedokles war überdies der Meinung, dass alle Körper beständig Ausflüsse aussenden, die wiederum durch die Poren in unsere Augen eindringen. Aus der Mischung der Sehstrahlen und der Körperstrahlen entsteht bei Empedokles der Seheindruck ([136], S. 362).

Das klingt fremdartig, wird aber nachvollziehbar, wenn man eine geometrische Analyse bezüglich des Sehvorganges nach Plato und Empedokles vornimmt. Eine solche Überlegung hatte Magnus in seiner „Augenheilkunde der Alten“ [132] angestellt. Die Überlegung geht davon aus, dass sowohl von dem Auge als auch von dem zu sehenden Gegenstand, divergente Strahlenbündel aus gehen. Das entspricht Empedokles’ Theorie. Diese treten nun in einer gedachten Ebene an den Kreuzungspunkten miteinander in Kontakt. Durch das Aufeinandertreffen der „Fühlstrahlen“ des Auges auf die „Leuchtstrahlen“ des Objektes werden die Fühlstrahlen am Ort der Kollision erschüttert. Die Erschütterung

Abb. 2.27 Darstellung des Sehaktes nach Empedokles-Plato, Magnus (1901) (aus [132], S. 106)



pflanzt sich nun in Richtung Auge fort und führt dort zur Wahrnehmung des vom Objekt ausgehenden Lichtes.

Dazu liefert Magnus folgendes Bild (Abb. 2.27):

Das Bild ähnelt einem Strahlengang durch eine Linse. Ersetzt man die Linie X-X₁-X₂ durch eine Sammellinse, hätte man hier tatsächlich die Abbildung eines Punktes A (des leuchtenden Objekts) auf einen Punkt B (hier das Auge) dargestellt.

Leukipp lehnte in seiner Großen Weltordnung die bisherige Idee von den Gestirnen als lebende Wesen ab. Er erklärt darüber hinaus, dass alle Dinge aus zahllosen Teilchen -den Atomen – aufgebaut seien ([137], S. 19). Er gilt nicht nur als Begründer des Atomismus sondern mit seinem Lehrsatz über den Geist auch als ein Vorreiter des Materialismus (aus ([137], S. 19)):

„Kein Ding entsteht ohne Ursache, sondern alles aus bestimmtem Grunde und unter dem Drucke der Notwendigkeit.“

Hintergrundinformation

Leukipps Leitmotiv des Determinismus ist auch nach mehr als 2500 Jahren noch erstaunlich aktuell. Der Nobelpreisträger 't Hooft sieht das im Dezember 2018 ganz ähnlich. In einem Interview wurde er von der Reporterin des Spektrum der Wissenschaften befragt, ob er den an den freien Willen glaube ([138], S. 23). Er antwortete ganz im Geiste des Leukipp:

„Ich glaube, dass alle Naturgesetze vollkommen deterministisch sind. Nichts geschieht ohne Grund.“

Die atomistische Idee des Leukipp verfeinerte dessen Schüler Demokrit in seiner „Kleinen Weltordnung“⁷⁹ zu einer Sehtheorie. Grundsätzlich unterscheidet Demokrit zwischen dem tatsächlichen Objekt und dessen Wahrnehmung (in [137], S. 60).

„Wir nehmen aber in Wirklichkeit nichts untrügliches wahr, sondern nur was nach der jeweiligen Verfassung unseres Körpers und der ihm zuströmenden oder entgegenwirkenden Einflüsse sich wandelt.“

Diese Aussage ist das Prinzip der virtuellen Realität: Was wir sehen, ist niemals das Objekt selbst, sondern immer nur das, was unseren Sinnen irgendwie dargeboten wurde. Diese Form der Einsicht nennt Demokrit die unechte Erkenntnis, zu der er Gesicht, Gehör, Geruch, Geschmack und Gefühl zählt [137], S. 61). Die Kenntnis von Demokrits Lehre der Sinneswahrnehmung entstammt hauptsächlich der Übermittlung des Theophrast „De sensu et sensibilibus“ (in [139], S. 207–213). Alle Dinge senden fortlaufend Atome aus, die als „Eidola“ („Bilderchen“) die Sinne erreichen und wahrgenommen so werden können.

Karl Marx hatte sich in seiner Dissertation mit den Unterschieden der Philosophie von Demokrit und Epikur auseinandergesetzt und kam dabei zwangsläufig auch auf die Eidola zu sprechen (aus [140], S. 297):

„Die Εἴδωλα [Eidola] sind die Formen der Naturkörper, die sich als Oberflächen gleichsam von ihnen abhäuten und sie in die Erscheinung tragen. Diese Formen der Dinge strömen beständig von ihnen aus und dringen in die Sinne und lassen eben dadurch, die Objekte erscheinen.“

„Eidola“ sind also kleine Abbilder, die von den Dingen ausgesendet werden und schließlich auf die Sinne des Betrachters treffen. Lukrez, ein Philosoph in der Tradition Epikurs, ist mit seinem Werk „de rerum natura“ [141] eine der Hauptquellen für Epikurs Naturphilosophie. Die Bilder-Theorie Epikurs ist dort in zahlreichen Versen beschrieben, wie sich die Bilder von den Dingen ablösen und unsichtbar bis ans Auge schweben, um dort die Wirkung des Sehens zu entfalten. Ein Beispiel für die außergewöhnliche Dichtkunst Epikurs (oder Lukrez's) soll hier aus der Übersetzung Knebels⁸⁰ „Von der Natur der Dinge“ gegeben werden ([143] Viertes Buch, S. 120):

Diese Bilder demnach, von denen ich rede, verbreiten sich überall, und werfen sich hin nach jeglicher Seite: Da wir jedoch allein mit dem Auge zu sehen vermögen, kommt es, daß nur von da, wohin sich wendet das Auge, da nur getroffen es wird von Gestalt und Farbe der Dinge. Auch bewirken die Bilder, daß wir von den Dingen den Abstand sehen, und daß wir hierin sie zu unterscheiden vermögen. Denn sobald sich das Bild ablöst so treibet und stößt es alle zwischen dem Aug' und ihm sich befindende Luft fort; diese dringet sodann bis hin zu dem Auge, bestreichelt gleichsam um die Pupille zuerst, und schlüpft hinein dann.

⁷⁹Diogenes Laertios berichtet in seinem 9. Buch, Demokrit hätte seine „Kleine Weltordnung“ 730 Jahre nach dem Fall Trojas verfasst ([129], S. 154).

⁸⁰Bekannt als der „Urfreund“ Goethes (nach einem Brief „An meinen alten Weimarschen Urfreund, Major von Knebel“ v. 30. Nov. 1817 ([142], S. 197).

Obgleich diese Betrachtungsweise zunächst fremd erscheint, finden sich darin Erkenntnisse, die noch heute gültig sind. Die Lehrmeinung „Bilder werfen sich hin nach jeglicher Seite“ lässt sich mit der aktuellen Definition „Licht breitet sich nach allen Seiten aus“ in Einklang bringen. Der Betrachter sieht vermittels der Bilder Gestalt, Farbe und Abstand der Dinge, also auch die Anordnung der Objekte im Raum. Die Wahrnehmung entsteht, wenn das (unsichtbare) Bild sich vom Objekt ablöst und durch die Pupille ins Auge schlüpft. Das kann durchaus als eine dichterische Umschreibung für eine optische Abbildung gelten.

Der Breslauer Ophthalmologe Magnus weist auf eine besondere Eigenart der Epikurischen Sehtheorie hin: Durch die mögliche Verschmelzung der in der Luft umherschwirrenden Bilder könnten auch wunderliche Wesen (z. B. Zentauren) wahrgenommen werden (aus [132], S. 104).

Von Sokrates ist überbracht, dass er vor allem die Kunst beherrschte, die scheinbar festgefügten Wahrheiten zu hinterfragen und die Diskutanten und das Publikum zum Zweifeln zu bringen. Es sind von Sokrates keinerlei eigene Werke überliefert, sodass die Kenntnis seiner Philosophie und Person hauptsächlich auf den Schriften seiner Schüler Platon und Xenophon⁸¹ beruht.

Die Anklage des Sokrates

Sokrates wird gern mit dem Spruch „Ich weiß, dass ich nichts weiß“ zitiert, der aus seiner Verteidigungsrede während der Anklage 399 v. Chr. stammt.

Sokrates wurde als alter Mann von seinen Widersachern angeklagt, die Jugend zu verderben und nicht an die Götter des Staates zu glauben. Die Gerichtsverhandlung fand vor ca. 500 ausgelosten Richtern (den Heliasten) statt. Der Antrag der Kläger lautete auf Todesstrafe. Platon berichtet in der „Apologie des Sokrates“ von einer Anekdote des Sokrates über die Weisheit während seiner Verteidigung.

Sokrates Freund Chairephon habe in Delphi das Orakel befragt, ob jemand weiser sei als Sokrates. Die Pythia, die weissagende Priesterin des Orakels von Delphi erklärte, dass niemand weiser als Sokrates selbst sei.

Sokrates war entgegen des Orakelspruchs im Zweifel über seine eigene Weisheit und begab sich unverzüglich an die Erforschung der Wahrheit. Er wandte dabei sich an einen Staatsmann, der bei vielen Menschen im Rufe der Weisheit stand. Sokrates gewann den Eindruck, dieser Mann käme am allermeisten sich selbst weise vor, sei es aber keineswegs. Dazu Sokrates ([146], S. 30):

„Diesem Mann bin ich allerdings an Weisheit überlegen; denn wie es scheint, weiß von uns beiden keiner etwas Rechtes und Ordentliches, aber er bildet sich ungeachtet seiner Unwissenheit ein, etwas zu wissen, während ich, meiner Unwissenheit mir bewusst, mir auch nicht einbilde etwas zu wissen. Es scheint also, ich bin doch ein kleines Stück weiser als er, nämlich um dies: was ich nicht weiß, das bilde ich mir auch nicht ein zu wissen.“

Am Ende der Gerichtsverhandlung wurde Sokrates zum Tode verurteilt, trank den Schierlingsbecher⁸² und starb.

⁸¹Xenophon überlieferte einige Dialoge des Sokrates (z. B. [144]), in seinem „Oikonomikos“ lässt Xenophon den Sokrates sogar über die Ökonomie philosophieren [145].

⁸²Ein in der Antike beliebter Gift-Cocktail zur Hinrichtung.

Im „Phaidon“ lässt Platon den Sokrates im Dialog über die Sinneswahrnehmung und Vernunfterkenntnis philosophieren. Sokrates spricht davon, wie Erkenntnis gewonnen werden kann und das Gerechte, Schöne und Gute, also das wahre Wesen des Beobachtungsobjektes, nicht mit den Sinnen erfasst werden kann ([147], S. 41):

„Wird nicht der von uns der wahren Erkenntnis eines jeden Dinges am nächsten kommen, der es sich am strengsten und schärfsten zur Aufgabe macht durch reines Denken das eigentliche Wesen des betrachteten Gegenstandes zu erforschen?“

Nach Platon basiert das Sehen auf drei entscheidenden Grundlagen: Den Augen, der Farbe und dem Licht (aus [148], S. 353–354).

„Wenn auch in den Augen Gesicht ist, und wer sie hat versucht es zu gebrauchen, und wenn auch Farbe für sie da ist: so weißt du wohl, wenn nicht ein drittes Wesen hinzukommt, welches eigens hierzu da ist seiner Natur nach, daß dann das Gesicht doch nichts sehen wird, und die Farben werden unsichtbar bleiben. – Welches ist denn dieses, was du meinst? fragte er. – Was du, sprach ich, das Licht nennst.“

Wenn das Licht allerdings nicht scheint, so sind die Augen „blöde“ und beinahe blind. Erst die Sonne verleiht „dem Sichtbaren das Vermögen gesehen zu werden“. Licht und Gesicht werden in diesem Dialog als Gleichnis für Wahrheit und Erkenntnis gebraucht. Platon unterscheidet zwischen den sichtbaren und dem denkbaren Dingen und trennt so das Erkennbare von dem Vorstellbaren, die Dinge von den Bildern und Schatten. Ungenügende Sinneseindrücke führen nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zur Erkenntnis, der Glauben an die Richtigkeit der Sinne kann mitunter sogar zur Fehlinterpretation der tatsächlichen Situation verleiten und die Trugbilder der Schatten und Spiegel für Abbilder realer Dinge halten. Damit wäre das eine nicht-reale Wahrnehmung – oder bereits eine einfache virtuelle Realität. Die Verquickung der Sinne mit dem Verstand und der Logik, mit Mathematik und Geometrie erhöht die Erkenntnisgenauigkeit. Doch erst das Wissen um die Dinge, die Zusammenhänge, Probleme oder Widersprüche, Ursachen und Wirkungen und deren dialektische Analyse kann zur Vernunft Einsicht föhren. Die Vernunft als erkenntnistheoretische Fähigkeit föhrt Platon durch Nutzung von These, Antithese, rhetorischem Diskurs und Einordnung zu seinen Ideen und Schlussfolgerungen.

Und so lässt Platon seinen Bruder Glaukon am Ende dieses Diskurses im 6. Buch der „Politeia“ ([148], S. 360) dem Sokrates „vernünftig“ antworten:

„Ich versteh ... und räume es ein, und ordne es so, wie du sagst.“

Platon hatte gewiss Einfluss auf seinen Schüler Aristoteles. Ebenso unbestritten ist aber sicherlich der maßgebliche Beitrag des Aristoteles zur Entstehung der systematischen Wissenschaften. Erkenntnis- und Wahrnehmungstheorie sind dabei auch bei Aristoteles

von zentraler Bedeutung. Aristoteles beschrieb in seinem Werk „Über die Seele“⁸³ die Sinne Gesicht, Gehör, Geschmack, Geruch und Gefühl⁸⁴ als Werkzeuge der Erkenntnis. Die Sinne sind dort nur für bestimmte Gegenstände empfindsam und die so wahrgenommenen Gegenstände folglich empfindbar. Der Prozess des Sehens wird scheinbar sehr einfach beschrieben: „Was man sehen kann, ist uns sichtbar“ ([149], S. 126). Diese Feststellung muss aber mit dem vorher gesagtem verstanden werden: Nur diejenigen Dinge, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können (eben die empfindbaren Dinge), werden für uns sichtbar. Sichtbar sind aber nicht die Dinge selbst, sondern die Farbe der Dinge, die erst durch das Licht sichtbar wird. Was aber ist das Licht?

Es ist zunächst das, mit dessen Hilfe man die Farben sieht und zudem etwas Durchsichtiges (wie Wasser, Glas oder Eis). Aristoteles beschrieb das Sehen so, wie es der heutigen Erkenntnis sehr nahe kommt (aus [149], S. 129):

„Die Wirksamkeit aber des Durchsichtigen ist das Licht. Dieses wird auch durch die Beobachtung offenbar. ... Denn die Farbe bewegt das Durchsichtige, (was zwischen den Augen und dem gefärbten Gegenstande ist,) z. B. die Luft. Von diesem, als einem Continuum wird der Sinnorgan, (das Auge) bewegt (afficirt.)“

Aristoteles grenzt sich deutlich von den früheren Lehrmeinungen Platons, Empedokles und Demokrits ab. Das Licht sei „weder ein Feuer oder sonst ein Körper, noch der Ausfluss eines Körpers“.

Nach Aristoteles beruht die Funktion des Sehens also auf der Wirkung des Objektes auf das Auge mittels des Lichtes. Die Quintessenz des Aristoteles ist der Satz „Visio non fit extramittendo“⁸⁵, der dem Schweizer Medizinhistoriker Koelbing sogar als „Aristotelisches Gesetz“ galt ([151], S. 7).

Aristoteles Lehrmeinung war für Jahrtausende maßgeblich. Mindestens ebenso beachtenswert wie Aristoteles war fraglos auch Euklid. Sein mathematisches Lehrbuch „Die Elemente“ ([152]) war bis in 19. Jahrhundert neben der Bibel das meist verbreitete Buch (aus [153], S. 18). Auf den ersten Blick scheint der große Mathematiker und Geometer trotzdem ein Anhänger der Emissionstheorie gewesen zu sein. In den Postulaten zu Euklids „Optica“ [154] finden sich darauf klare Hinweise⁸⁶. Euklid setzte voraus, dass die geraden Linien, die vom Auge ausgehen, große Zwischenräume durchqueren können.

⁸³Griech. „Peri psyches“, lat. „De anima“.

⁸⁴„die Farben, der Schall, das Schmeckbare, das Riechbare und das Fühlbare“ ([149], S. 125).

⁸⁵dt.: „Sehen geschieht nicht durch Ausstrahlung“ (aus dem Index einer lat. Ausgabe des Aristoteles von 1530 [150]).

⁸⁶Natürlich wurden in den folgenden zwei Jahrtausenden nach Erstellung der „Optica“ immer wieder Abschriften des griechischen Urtextes angefertigt und Übersetzungen ins Lateinische (z. B. [155]) und Arabische (z. B. [156]) vorgenommen. Nach Lindberg ([157], S. 210) ist die häufigste Variante eine direkte Übersetzung aus dem Griechischen, die mit dem Incipit „Ponatur ab oculo eductas rectas lineas...“ beginnt (oder einer Variante dessen ist, z. B. [158]).

Ferner gehen die Linien kegelförmig vom Auge aus, wodurch dieser Kegel seine Spitze (dem Ursprung der Strahlen) im Auge hat und mit der anderen Seite (der Basisebene des Kegels) die Dinge sieht⁸⁷. Euklids gerade Sehstrahlen lassen eine geometrische Betrachtung des Sehens zu und erlauben die Erklärung wahrgenommener Größen und Richtungen im euklidischen Raum.

Der euklidische Raum

Noch bis ins 19. Jhd. wurde allgemein davon ausgegangen, dass Euklids mathematische und geometrischen Beschreibungen völlig ausreichend wären, den uns bekannten dreidimensionalen physikalischen Raum zu erklären. Der Zusatz „euklidisch“ wurde erst nötig, nachdem die Erklärungen Euklids nicht mehr genügten, die gesamte Geometrie vollständig zu beschreiben.

Wie viele Generationen von Mathematikern hatte sich auch Lobatschewski mit Euklids Parallelenaxiom herumgeschlagen. Darin hatte Euklid erklärt, dass sich durch einen außerhalb einer Geraden liegenden Punkt durch ebendiesen Punkt (in dieser Ebene) nur eine einzige Parallele zu der Geraden ziehen lässt. Umberto Eco lässt dazu seinen Protagonisten in „Die geheimnisvollen Flamme der Königin Loana“ eine verständlichere Erklärung geben ([159], S. 10):

„Die verzweifelte Einsamkeit der Parallelen, die sich niemals begegnen...“

Diese verzweifelten Parallelen verführten Lobatschewski zur Beschäftigung mit den Parallelen. Im Februar 1826 legte er der Kasaner Hochschule einen Aufsatz vor, in dem er angab, den Streit „zum Austrag gebracht zu haben“⁸⁸. Anders jedoch, als alle anderen vor ihm, fand er eine Lösung. Zunächst erkannte Lobatschewski die Unbeweisbarkeit des Parallelenaxioms und schlug eine von dem Axiom unabhängige Lösung vor, die Gauß schon einige Jahre vorher in seinen Briefen an seinen Freund Bolyai, als die „Nicht-Euklidische“ bezeichnet hatte.

Der Mathematiker Wolfgang Bolyai beschwore seinen Sohn Johann, sich keinesfalls -wie er selbst- mit dem Parallelenaxiom zu beschäftigen (aus [161], S. 56):

„Du darfst die Parallelen auf jenem Wege nicht versuchen; ich kenne diesen Weg bis an sein Ende – auch ich habe diese bodenlose Nacht durchmessen, jedes Licht, jede Freude meines Lebens sind in ihr ausgelöscht worden. Ich beschwöre Dich bei Gott! laß die Lehre von den Parallelen in Frieden ...“

Der Mathematiker Riemann nutzte Gaußens Idee der krummen Flächen [162] und erweiterte diese auf eine höher Zahl von Dimensionen [163]. Eine höhere Zahl von Dimensionen widerstrebt dem menschlichen Erfahrungsraum und ist damit eigentlich unvorstellbar. Versteht man aber diese höherdimensionalen Räume nicht als esoterische Absonderlichkeit, sondern als bloße analytische Fiktionen und Hilfsmittel zur Vereinfachung von Berechnungen, lassen sich die Dinge

⁸⁷Lat.: „1. Ponatur ergo, radios ab oculo emissos, in rectam lineam ferri, aliquoque interuallo inter se distare. 2. Item, figuram a radiis comprehensam, esse conum, qui verticem habeat in oculo, basim vero in extremis rerum visarum.“ (aus [154], S. 4)

⁸⁸Das Dokument titelte „Exposition succincte des principes de la géométrie avec une démonstration rigoureuse du théorème des parallèles“ ([160], S. 371) und findet sich in der Abhandlung „Ueber die Anfangsgründe der Geometrie“ ([160], S. 1–66).

wieder handhaben. Als „gedankliche Hilfsmittel der Anschauung“ bzw. „physikalische Hilfsvorstellungen“ werden diese höheren Dimensionen in dem lesenswerten Vortrag von Carl Cranz „Gemeinverständliches über die sogenannte vierte Dimension“ [164] bezeichnet. Für Einstein und Minkowski, der mit dem nach ihm benannten Minkowski-Raum eine elegante Beschreibung der Relativitätstheorie vorschlug [165], war schließlich ein höherdimensionaler Raum mit der Zeit als vierter Dimension eine Notwendigkeit zur Beschreibung der Raumzeit und bildete so eine Grundlage der Relativitätstheorie.

Aristarchos vertrat die Hypothese eines heliozentrischen Weltbildes, wie uns Archimedes von Syrakus berichtet: „Dann er setzt die Fix- oder Haftsterne samt der Sonne als unbeweglich; die Erde aber beweglich umb die Sonne...“ (aus [166], S. 2). Allerdings ist nicht Aristarchos, sondern der Name Ptolemäus eng mit dem geozentrischen Weltbild verbunden, das beinahe anderthalb Jahrtausende das Verständnis des Weltalls prägte.

Ptolemäus hatte darüber hinaus aber auch auf den Gebieten der Mathematik und Optik gewirkt. Sein Buch der Optik wurde durch Eugenius von Palermo vor dem Vergessen bewahrt⁸⁹, der die verfügbaren Handschriften als „Liber de Optica“ [168] ins Lateinische übertrug⁹⁰.

Ptolemäus' Sehtheorie basierte wie die seiner Vorgänger grundsätzlich auch auf der Vorstellung, dass ein physischer Kontakt zwischen dem Auge und dem Objekt stattfinden muss. Die beiden scheinbar widerstreitenden Theorien der aktiven Aussendung des Feuers durch das Auge (Emissionstheorie) und der atomistischen Licht- oder Bildempfindung (Immissionstheorie) vereinigte Platon mit der Verschmelzung von Sehen und Licht. Diese platonische Kollision zweier Materieströme, das als „efflux“ bezeichnete doppelte Ausströmen der Materie, existierte auch in Ptolemäus' Verständnis. Die Emanation, das Ausströmen der Lichtmaterie vom Auge, erzeugt eine pneumatische Ausbreitung des visuellen Flusses in der Luft, die auf die Objekte trifft und vom Auge bemerkt wird. Der visuelle Fluss allein genügt aber nicht allein zum Sehen der Objekte, es wird auch eine gewisse Helligkeitsdichte⁹¹ am Sehpunkt benötigt, um die Objekte wirklich zu sehen. Wie Aristoteles ist auch Ptolemäus der Ansicht, dass die wichtigste Funktion dabei der Farbe zukommt, um das Objekt zu sehen.

Die in der ptolemäischen Theorie verwendete Aufteilung in Sehstrahl und Lichtstrahl führt mitunter zu Schwierigkeiten bei den nachfolgenden Erläuterungen von Reflexion und Brechung, der eigentlichen Optik. Dennoch ist sein Buch ein frühes Beispiel für den wissenschaftlichen Ansatz, eine Theorie durch das Experiment zu stützen.

⁸⁹Nach Smith basiert Eugenius' Text auf einer „übel zugerichteten“ lateinischen Übersetzung der damals verfügbaren arabischen Übersetzung des verlorengegangenen griechischen Urtextes (aus [167], S. 7 ff.).

⁹⁰Obgleich der Text immer wieder kommentiert wurde (z. B. 1812 von Jean-Baptiste Delambre [169]) wurde erstaunlicherweise die allererste gedruckte Version des lateinischen Textes (in der Übersetzung des Eugenius von Palermo) erst 1885 durch Gilberto Govi herausgegeben [170].

⁹¹„lucida spissa“ (aus [170], S. 8).

Die Luft als Überträger des Sehens war zur Zeit des Ptolemäus sehr verbreitet. Auch Cicero hatte im zweiten Buch „Von dem Wesen der Götter“ über die Wichtigkeit der Luft zum Erhalt des Lebens und als Medium der Sinne geschrieben: „...und die Luft selbst sieht mit uns, hört mit uns...“. (aus [171], S. 600). Die physische Wirkung des Sehens wird von Stoikern durch das Pneuma⁹² beschrieben.

Stoiker

Die Stoiker waren Anhänger der philosophischen Lehre der Stoa (begründet von Zenon von Kition um 300 v. Chr.), nach der die Welt und Natur auf einem universellen Prinzip, das mit Hilfe von Physik, Logik und Ethik erkannt werden kann. Der Stoiker strebt mit Gelassenheit und Seelenruhe nach Weisheit, das Ideal der stoischen Gemütsverfassung ist die „Apeitheia“, die Abwesenheit von Affekten. Das Adjektiv „statisch“ bezeichnet noch heute die Eigenschaften unerschütterlich; gleichmütig und gelassen. Berühmte Stoiker waren Seneca und der römische Kaiser Marc Aurel.

Der Begriff der Sinneswahrnehmung, im Griechischen „Aisthesis“, wird gleich im ersten Satz in Aristoteles' Metaphysik erklärt: „Alle Menschen verlangen von Natur nach dem Wissen; ein Zeichen dessen ist ihre Liebe zu den Sinneswahrnehmungen, die sie, auch abgesehen von dem Nutzen, um ihrer selbst willen lieben; insbesondere die des Gesichts.“ (aus [108], S. 9).

Bei den Stoikern ist das Pneuma eine Ursache der Wahrnehmung. Das Pneuma erzeugt die Sinneswahrnehmung im Auge durch Interaktion mit der Luft und umfasst so ein Objekt gleichsam wie mit Polypenarmen. Das Sehpneuma interagiert mit der Luft, erhellt und spannt⁹³ diese keilförmig, wobei die Basis des Keils das Sehobjekt quasi wie mit einem Stock betastet⁹⁴.

Für den Arzt Galen war das Pneuma das fundamentale Prinzip des Lebens⁹⁵. In physiologischer Betrachtung fungiert das Pneuma als Ursache jeglicher vegetativer Lebenstätigkeit, wie z. B. Ernährung, Stoffwechsel, Wachstum oder Fortpflanzung, hier als „Pneuma physicon“ mit Sitz in der Leber. Galen hoffte, dass es dereinst gelingen möge, denjenigen Anteil des Pneumas aus der Luft zu extrahieren, der bei der Atmung im Blut aufgenommen wurde. Diesen gibt es tatsächlich: Es ist der Sauerstoff. Der Nachweis gelang freilich erst zum Ende des 18. Jahrhunderts mit der Entdeckung der Bedeutung des Sauerstoffes bei Verbrennung und Respiration (Atmung) durch Lavoisier und Laplace [174]. Eine andere Form des Pneumas, das „Pneuma psychikon“ mit Sitz im Gehirn, ist für die psychischen Prozesse von Denken, Empfinden oder Willen zuständig und dient somit als Seele oder Geist. Eine dritte Form schließlich war die

⁹²Griech. Pneuma, luft- oder feuerartige Substanz als Grundprinzip von Natur und Leben.

⁹³Pneumatische Spannung, griech. Tonos, die sich „in kugelförmigen Wellen ... zeitlos fortpflanzt“ (aus [136], S. 382); ein schon an Huygens Elementarwellen erinnerndes Bild.

⁹⁴s. a. Ingenkamp „Zur stoischen Lehre vom Sehen“ [172].

⁹⁵s. a. Haeckel „Die Welträthsel.“ ([173], S. 48 und 49)

Ursache von Puls oder Herzschlag. Das „Pneuma zotikon“ mit Sitz im Herzen steuerte die sogenannten „sphygmischen Funktionen“, die vom Puls (griechisch Sphygmos) verursacht werden.

Galens besprach in seinem Werk über die Theorien des Hippokrates und Platon „De placitis Hippocratis et Platonis“ [175] die Sehtheorien und erkannte zwei prinzipielle Alternativen:

„Ein Objekt, das gesehen wird, tut eines von zwei Dingen: Entweder sendet es etwas von sich zu uns und gibt dadurch einen Hinweis auf seine eigene Gestalt oder, wenn es selbst nichts sendet, wartet es darauf, dass eine Sinneskraft von uns auf es kommt.“⁹⁶

Die erste Möglichkeit erschien ihm äußerst unwahrscheinlich, da er sich nicht erklären konnte, wie die Bilder großer Berge dramatisch verkleinert werden, um durch die Pupille zu passen oder wie die Bilder dieser Berge gleichzeitig mehrere Beobachter erreichen können. Wenn also der Berg nicht zum Betrachter kommt, muss eben der Betrachter den Berg erreichen. Galen schloss daraus, dass demzufolge die sensorische Kraft des Sehenden irgendwie auf den Berg treffen muss.

Das Pneuma kommt nach Galen vom Auge her in Kontakt mit der Luft und verändert diese auf bestimmte Weise, sodass das Pneuma nun vom Objekt ins Auge bis hin zu den optischen Nerven gelangen kann. Damit wird die Umgebungsluft gemeinsam mit dem beleuchtenden Licht der Sonne zum bildvermittelnden Medium, das zwischen den Nerven des Gehirns und dem Objekt steht und es so nur im übertragenen Sinne „berührt“. Damit entfernt Galen sich vom Bild des tastenden Stocks der Stoiker, was er auch deutlich macht

„Die Stoiker dürfen also nicht sagen, dass wir mit Hilfe der Umgebungsluft wie mit einem Spazierstock sehen.“⁹⁷

Alhazen beschrieb im ersten Jahrtausend n. Chr. in einem Aufsatz „Abhandlung über das Licht“ [176]⁹⁸ die Ausbreitung des Lichtes auf Linien, längs derer sich das Licht fortpflanzt. Von Interesse ist hier zunächst die Feststellung: „Die Art des Fortschreiten des Lichtes ... geschieht ... in der Art, dass das Licht von einem jeden Punkte nach allen Seiten in der Richtung gerader Linien forschreitet bis dahin, wo es endigt.“ (aus [177], S. 349). Hierin wird die allgemeingültige Form der Lichtausbreitung erläutert: Das Licht

⁹⁶Nach der engl. Übersetzung v. DeLacy: „A body that is seen does one of two things: either it sends something from itself to us and thereby gives an indication of its peculiar character, or if it does not itself send something, it waits for some sensory power to come to it from us.“ (aus [175], S. 453).

⁹⁷Nach der engl. Übersetzung v. DeLacy: „The Stoicks, then, must not say that we see by means of the surrounding air as with a walking-stick.“ (aus [175], S. 475)

⁹⁸In der dt. Übersetzung v. Wiedemann [177].

breitet sich geradlinig und nach allen Richtungen aus. Diese Erkenntnis, die unmittelbar klar und einleuchtend erscheinen mag, bildet aber die Grundlage für ein noch heute brauchbares Modell der Abbildung (aus [177], S. 340):

„Das Licht, welches in dem durchsichtigen Körper auf geraden Linien fortschreitet, heisst „Strahl“. Die geraden Linien sind gedachte (mathematische) Linien, die nicht gefühlt werden können. Sie selbst nebst dem auf Ihnen fortschreitenden Lichte bilden die Strahlen. Die Strahlen sind ein Bild des Wesens des Fortschreitens auf geraden Linien.“

Das „Bild des Wesens“ ist ein Modell, das „Fortschreiten auf geraden Linien“ ein Strahl. In der Übersetzung von Baarmann, dem eine andere Handschrift zu Verfügung stand [178], wird der Modellcharakter der Lichtstrahlen sogar noch etwas deutlicher (aus [179], S. 214):

„Die geraden Linien aber, auf denen das Licht vordringt, sind eingebildete, nicht sinnlich wahrnehmbare Linien. Die eingebildeten Linien nun zugleich mit dem auf ihnen vor dringenden Lichte, dieses beides zusammen ist das was Strahl genannt wird.“

Die Lichtstrahlen Alhazens unterscheiden sich deutlich von den Seh- oder Gesichtsstrahlen des Euklid oder Aristoteles. Deren grundsätzliche Ansicht war ja, dass die Sehstrahlen dank einer feurigen Sehkraft vom Auge ausgehen und das Objekt quasi mit dem Lichte des Feuers befühlen. In Berührung mit dem Objekt kamen auch die Stoiker mit dem gespannten Pneuma oder Galen mit dem irgendwie fühlenden Pneuma. Alhazen trennte sich nun radikal von dieser taktilen Sichtweise und insgesamt von der Sehstrahlentheorie und erkannte „.... dass das Sehen mittelst eines Bildes stattfinde, welches sich von dem Gesehenen zu dem Auge sich fort pflanze...“ und „.... im Mittelpunkt des Auges von der Seite des Lichtes her zusammentrifft.“ (aus [177], S. 341).

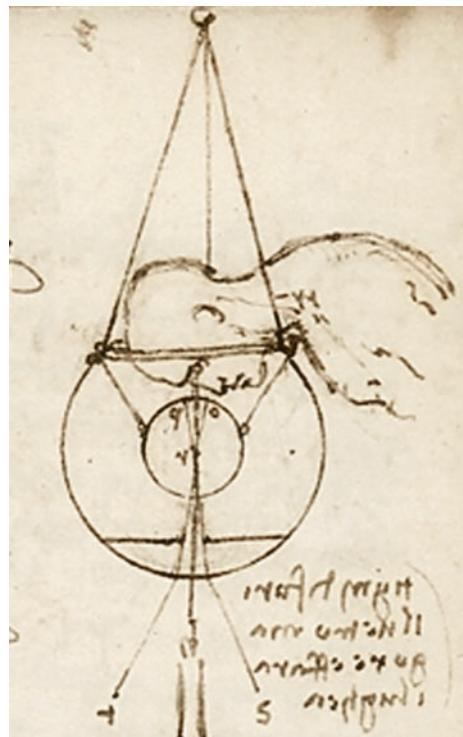
Dies ist eine bahnbrechende Erkenntnis. Das Licht existiert unabhängig vom Betrachter und bahnt sich durch das durchsichtige Medium aus Luft, Wasser oder Glas den Weg vom Gegenstand zum Auge. Die Medien verändern den Weg des Lichtes durch Brechung und Reflexion und führen zu einer optischen Abbildung.

Eine optische Abbildung hatte auch da Vinci als wesentlich für das Sehen betrachtet. Es sind von seiner Hand nicht nur zahlreiche Querschnitte durch das menschliche Auge oder Abbildungen durch Strahlen erhalten⁹⁹, sondern sogar die Zeichnung eines Apparates, mit dem das menschliche Sehen nachgeahmt werden kann Abb. 2.28.

Allerdings war nach da Vincis Meinung der Prozess der Abbildung ein völlig anderer als nach unserem heutigen Verständnis. Ähnlich wie die Vorstellung der „Eidola“, sendeten in da Vincis Vorstellung die Gegenstände ständig Abbilder von sich aus, die

⁹⁹s. z. B. Fehrenbach „Der oszillierende Blick. Sfumato und die Optik des späten Leonardo“ [180].

Abb. 2.28 Augenapparat,
Leonardo da Vinci (1508) aus
Manuskript D, fol. 3 verso,
Paris, Institut de France



an jeder Stelle um den Gegenstand punktförmig konvergieren. Der Raum ist vollständig mit punkthaften Bildern des Gegenstands gefüllt. Vom Auge aus betrachtet existiert also immer eine Möglichkeit, eine Sehpyramide zum Gegenstand zu zeichnen (mit der Pupille in der Spitze der Pyramide). Da Vinci beschreibt das selbst so (aus [181], S. 43):

Wie der Stein, ins Wasser geworfen, sich zum Mittelpunkte macht und verschiedene Kreise verursacht, so verbreitet der in der Luft erzeugte Ton sich in Kreisen; so breitet jeder Körper, der in die leuchtende Atmosphäre gestellt ist, sich in Kreisen aus und füllt die umgebenden Teile mit zahllosen seiner Abbilder und erscheint als Ganzes völlig und völlig in jedem Teile.

Betrachtet man die Ergebnisse von da Vincis Arbeit, so scheint die Einfachheit und Klarheit dieser Punktbilder, die sich auf geraden Linien im Raum bewegen, ganz offensichtlich den perspektivischen Anforderungen an die Gestaltung genüge getan zu haben. Vermutlich aber kollidierte diese Theorie mit der zunehmenden Kenntnis der

Optik durch Bücher von Bacon, Pecham oder Witelo [180] und nicht zuletzt mit der praktischen Anatomie des Auges durch da Vinci selbst. Es ist nicht eindeutig, ob da Vinci die optische Wirkung von Linsen gebührend einschätzte, wohl aber, dass er sich -insbesondere in seinen optischen Skizzen (z. B. im Manuscript D [182])- intensiv damit beschäftigte. Die fehlende optische Wirkung¹⁰⁰ (mit heutiger Kenntnis betrachtet) in einem seiner berühmtesten Gemälde, dem „Salvator Mundi“¹⁰¹, hatte Zweifel an der Urheberschaft da Vincis aufkommen lassen. Allerdings ist keineswegs sicher, dass Leonardo da Vinci alle seine wissenschaftlichen Kenntnisse auch immer auf sein künstlerisches Schaffen übertrug [184]. Eine teilweise verzerrte Darstellung in einer Abbildung des Heilands wäre zu dieser Zeit kaum angemessen gewesen.

Jedenfalls hatte der Anatom Platter wenig später erkannt, dass die optische Abbildung beim Sehen über die Augenlinse stattfindet, das primäre Sehen¹⁰² aber über den netzförmigen Nerv¹⁰³ der Retina funktioniert.

In seinem großem Werk „Ad Vitellionem Paralipomena: Astronomiae Pars Optica Traditur“¹⁰⁴ [185] gibt Kepler die anatomischen Zeichnungen des Auges von Platter wieder (s. Abb. 2.15), kritisiert den Mediziner aber auch ein wenig für seine fehlenden mathematischen Kenntnisse (s. [185], S. 208). Kepler meint schließlich ein wenig versöhnlich, dass Platter nicht weiter von der wahren Erkenntnis entfernt war, als der Beruf des Arztes von der Mathematik entfernt ist¹⁰⁵.

Kepler entwickelte in der 1611 erschienenen „Dioptrik“ [187] aus der Wirkung geschliffener Gläser und durchsichtiger Kristalle eine Theorie zur Abbildung mittels Linsen. Kepler erkannte die Funktionsweise der Augenlinse als den abbildenden Teil des Auges und das durch die Linse umgekehrte Bild auf der Netzhaut. Der Seheindruck entsteht bei Kepler durch Abbildung der sichtbaren Dinge auf der mit geistigem Stoff angefüllten Netzhaut (aus [188], S. 28):

„Das Sehen ist eine Gefühlstätigkeit der gereizten und mit Sehgeist erfüllten Netzhaut; oder auch: Sehen heißt die Reizung der Netzhaut fühlen, soweit sie gereizt wird. Die Netzhaut wird bemalt von den farbigen Strahlen der sichtbaren Welt.“

¹⁰⁰z. B. Walter Isaacson in einer Biographie über Leonardo da Vinci: „But Leonardo failed to paint the distortion that would occur when looking through a solid clear orb at objects that are not touching the orb.“ (aus [183], S. 333)

¹⁰¹Lat. „Erlöser der Welt“.

¹⁰²„pars primaria visionis“ ([57], S. 187).

¹⁰³„nervus retiformis“ von lat. rete = Netz + forma = Gestalt ([59], S. 218).

¹⁰⁴Ergänzungen zu Witelo, in denen der optische Teil der Astronomie fortgeführt wird.

¹⁰⁵Im Original: „Confer iam modum verum visionis à me propositum cum illo PLATERI, videbis, clarissimum virum non longius à vero abesse, quām quantum professione Medicum, qui Mathematica non dedita opera. tractat, abesse consentaneum est.“ (aus [186], S. 187)

Die Sehtheorie Keplers ist im Wesentlichen diejenige, die das Verständnis des physikalischen Sehprozesses geprägt hat, das bis heute Bestand hat.

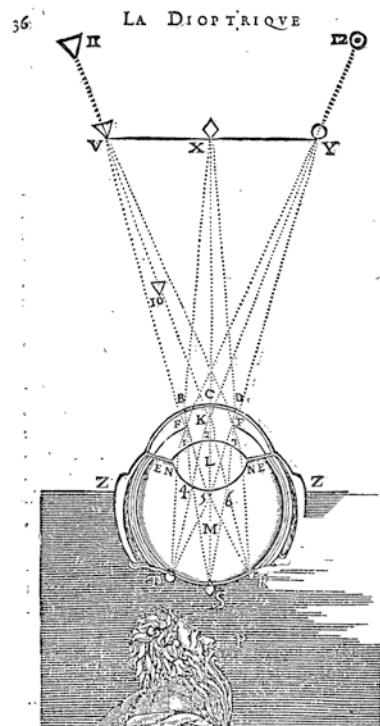
Descartes hatte ein ebenso klares Verständnis des Sehprozesses wie Kepler. In seiner reich bebilderten Darstellung der Optik und des Sehens [114] ist der Abbildungsprozess im Auge sehr gut dargestellt. Hier soll besonders auf die umgekehrte Abbildung der Objekte V, X und Y zu deren Netzhautpositionen T, S und R hingewiesen werden (Abb. 2.29).

In seiner Eigenschaft als Philosoph stellt Descartes die Realität der Sinneseindrücke infrage und zweifelt an der rein physikalischen Richtigkeit der Sinne (aus [189], S. 99):

„Auch alles Andere, was ich von den Gegenständen der Sinne annahm, schien mich die Natur gelehrt zu haben; ... Später indess haben mancherlei Erfahrungen allmählich das ganze Vertrauen, was ich auf die Sinne setzte, geschwächt.“

Die Zweifel an Allem bilden die Basis für Descartes' Erkenntnistheorie. Die Realität des Wirklichen, die sogenannte formale Realität, wird durch die Wahrnehmung und das Denken zur gegenständlichen Realität der Vorstellung ([189] ab S. 52). Im Prinzip enthält seine Erkenntnis der Möglichkeit einer imperfekten, fehlerhaften Wahrnehmung auch schon die Möglichkeit zur Täuschung, zur Erzeugung einer virtuellen Realität.

Abb. 2.29 umgekehrte
Abbildung im Auge, René
Descartes (1657), aus [114]
„La Dioptrique“, S. 36



Descartes Vorstellung, dass Körper und Geist, also Leib und Seele, zwei unabhängige Substanzen seien, die erst miteinander zur Erkenntnis führen können (Cartesianischer Dualismus) hat als Kern die durchaus mechanische Vorstellung eines logisch erklärbaren Aufbaus der Dinge und ihrer Funktion. Erst die Vernunft, die Fähigkeit zu denken und zu sprechen, macht aus der Maschine den Menschen.

Newton löste sich von der philosophisch-hypothetischen Betrachtung der Naturerscheinungen und überprüft seine Behauptungen mit dem Experiment (im ersten Buch der Optik [190], S. 5):

„Es ist nicht meine Absicht, in diesem Buche die Eigenschaften des Lichts durch Hypothesen zu erklären, sondern nur, sie anzugeben und durch Rechnung und Experiment zu bestätigen.“

Damit stellte Newton die optische Abbildung auf eine feste physikalische Grundlage. Dennoch bleibt die Erkenntnis vieler Philosophen vor ihm richtig, dass sich das Sehen nicht nur auf die reine Abbildung, beschränkt, sondern erst mit dem Verstand und über das Denken zu einer Wahrnehmung führt. Und deshalb gebührt Descartes der letzte Satz dieses Abschnitts (aus [189], S. 45).

„Ich denke, also bin ich“

2.4 Antike Perspektiven

Die Anwendung der Perspektive im Altertum

Allgemein bekannt sind die zahlreichen Kunstwerke aus dem ägyptischen und assyrischen Altertum oder der griechischen und römischen Antike, von denen hier die Büste der Nofretete als Beispiel der hochstehenden handwerklichen Fertigkeiten dieser Epoche dienen soll. Die Statue befindet sich seit ihrer Entdeckung im Ägyptischen Museum auf der Museumsinsel in Berlin (Abb. 2.30).

Die Büste der Nofretete wurde 1912 in den Ruinen der Werkstatt des Thutmosis gefunden und diente diesem vermutlich als Modell zur Herstellung weiterer Statuen.

Hintergrundinformation

Erstaunlich ist nicht nur der überwältigende Realismus der Figur, sondern auch deren Farbigkeit. Infolgedessen vermutet der Schweizer Schriftsteller Stierlin in seinem Buch „Le buste de Néfertiti: une imposture de l'égyptologie?“¹⁰⁶ [191] sogar einen Betrug. Der damalige Ausgrabungsleiter Borchardt hätte die Figur vom Berliner Bildhauer Marcks nur anfertigen lassen, um daran antike Pigmente zu testen. Bochardt selbst beschreibt in seinem Buch „Porträts der Königin Nofret-Ete“ jedenfalls die Auffindung der Nofretete recht ausführlich (aus [192], S. 30–31):

¹⁰⁶dt.: „Die Büste der Nofretete: Ein Betrug der Ägyptologie?“

Abb. 2.30 Büste der Nofretete im Neuen Museum, Ägyptisches Museum und Papyrussammlung der Staatlichen Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz, Fotograf Philip Pikart (2009), Wikimedia Commons



„Als ich am 6. Dezember 1912 bald nach der Mittagspause durch einen Zettel des gerade die Aufsicht führenden Prof. Ranke eiligest nach Haus P47,2 gerufen worden war, fand ich in dem Raume 19 östlich der „breiten“ Halle ... bereits die soeben zum Vorschein gekommenen Bruchstücke einer lebensgroßen farbigen Büste Amenophis' IV. vor. ... Dann wurde ... vor uns zuerst nur ein fleischfarbener Nacken mit aufgemalten roten Bändern bloß. „Lebensgroße bunte Büste der Königin“ wurde angesagt und niedergeschrieben, die Hacke beiseite gelegt und mit den Händen behutsam weitergearbeitet. ... Dann wurde die bunte Büste erst herausgehoben und wir hatten das lebensvollste ägyptische Kunstwerk in Händen.“

Hätte Stierlin also mit seiner These recht, so müsste nicht nur Ranke an dem Betrug beteiligt gewesen sein, sondern auch die anderen Mitglieder des Grabungsteams. Diese Möglichkeit ist natürlich nicht ausgeschlossen, nimmt aber mit wachsender Zahl der Geheimsträger ab.

Unabhängig davon, ob nun diese Skulptur eine echte Kostbarkeit oder nur eine gemeine Fälschung ist, finden sich unzählige weitere Kunstwerke aus antiker Vorzeit, die mit

hoher Wahrscheinlichkeit nicht allesamt Fälschungen sein werden und in ihrer Gesamtheit als Nachweis der schon damals hochstehenden Fertigkeiten und dem Bedürfnis nach maximaler Realitätstreue gelten dürfen. Die Büste der Nofretete wurde 1992 und 2006 mittel Computertomografie vermessen [193] und 2008 nochmals mit einem 3D-Streifenlichtscanner aufgenommen, der eine deutliche höhere Messgenauigkeit ermöglichte. Der 3D-Datensatz zusammen mit hochauflösenden Bildern des Rathgen-Forschungslabors [194] diente der Gipsformerei der Staatlichen Museen zu Berlin als Vorlage für ein besonders realistisches Replikat [195]¹⁰⁷.

Die hochstehende Qualität solcher Skulpturen aus ägyptischer, griechischer oder römischer Vorzeit ermöglichte noch heute eine lebhafte Vorstellung vom Aussehen damaliger Würdenträger. Diese Art der Wiedergabe ist naturgemäß durch den Aufwand der Herstellung begrenzt. Die Nachbildung großer Figurengruppen ist daher selten, obgleich nicht gänzlich unbekannt. Der erste chinesische Kaiser Qin hatte nicht nur die Chinesische Mauer bauen lassen, sondern ebenfalls ein riesiges Mausoleum für sein geplantes Leben nach dem Tode. Sein Grabmal verfügte über eine vollständige Armee aus tausenden von Terrakottakriegern, Wagen, Pferden und Beamten, eben alles was ihm für ein anständiges Leben nach dem Tode wichtig erschien.

Etwa um die gleiche Zeit wie Kaiser Qin in China lebte Archimedes im griechischen Syrakus, der als großer Mathematiker gilt und dessen physikalische Berechnungen und Erfindungen zum Teil bis heute in Benutzung sind. Dem Archimedes schreibt Fabricius auch eine Abhandlung über die Perspektive zu, die in arabischer Sprache vorläge (s. a. [196], S. XI), allerdings bis heute nicht gefunden wurde. Wahrscheinlicher scheint, dass Archimedes in der Spiegelkunst¹⁰⁸ bewandert gewesen sein soll, auf eine solche Schrift berufen sich zumindest spätere Kommentatoren ([197], S. 45).

Die Brennspiegel des Archimedes

Seit zwei Jahrtausenden wird die Geschichte erzählt, Archimedes habe mit Brennspiegeln die Flotte eines angreifenden Feindes in Brand gesteckt. So schreibt Galen (in der Übersetzung von Wilde, aus [198], S. 26): „So aber, wie ich glaube, soll auch Archimedes die Flotte der Feinde durch Zündmaschinen verbrannt haben.“. Wenn auch diese Anekdote auf den ersten Blick einleuchtend und wahr erscheinen mag, wurde doch der Wahrheitsgehalt immer wieder infrage gestellt und die Machbarkeit nachgeprüft. Bereits 1747 hatte der Buffon einen Brennspiegel aus 168 ebenen Spiegeln hergestellt, mit denen er Holz anzünden und Metalle schmelzen konnte (aus [198], S. 30). Das Experiment wurde 2010 in der Fernsehserie „MythBusters“ wiederholt. Der amerikanische Präsident Obama hatte die Mythbusters um die Aufklärung des Mythos gebeten. Im Test konnten die Mythbusters ein Schiff auch mit 500 Spiegeln nicht entzünden und mussten dem Präsidenten mitteilen, der Mythos sei zerstört [199].

„Busted!“

¹⁰⁷Das handbemalte Replikat GF 539 der Büste der Nofretete in höchster Qualität kann bei den Staatlichen Museen Berlin für 8900 EUR erworben werden (Stand 2019).

¹⁰⁸Katoptrik.

Dem Agatharchos lässt Plutarch in der Biografie des Perikles durch den Zeuxis sagen, dass er sich selbst seiner Langsamkeit im Malen rühme und dadurch seine Werke schöner und langfristiger angelegt seien ([200], S. 118). Das führt zu zwei Erkenntnissen. Der Maler Agatharchos konnte schneller malen als Zeuxis (was diesen offensichtlich wußte, aber heute eher unwichtig ist) und Agatharchos lebte zur Zeit des Perikles und Zeuxis. Das ist von größerem Interesse, da Agatharchos später wieder in den Büchern des Vitruv auftaucht und dort in Verbindung mit perspektivischer Malerei gebracht wird. In den zehn Büchern über Architektur („De architectura libri decem“) schreibt Vitruv (aus [201], S. 325):

„Zuerst nämlich stellte Agatharchos zu Athen, als Äschylos der Tragödie Bahn brach, die Scena (Bühnenwand) her, und hinterließ eine Abhandlung über dieselbe. Dadurch angeregt schrieben Demokritos und Anaxagoras über denselben Gegenstand, wie man nämlich die Linien der optischen Wirkung und dem Auseinandergehen der Räden von einem gewissen angenommenen Punkte aus in natürlicher Weise entsprechend machen müsse, so dass auf dem Wege der Täuschung die Darstellungen auf den Bühnenbildern (Dekorationen) den Schein der Wirklichkeit erhalten.“

Aus der Darstellung der Szene durch grafische Mittel leitet sich die griechische Bezeichnung der Bühnenmalerei ab: „Skenographia“. Diese Bezeichnung ist schon in Aristoteles „Poetik“ überliefert, in der Aristoteles auch über den handwerklichen Aufbau der Tragödie schreibt. Aristoteles erwähnt zunächst den Aischylos, der einen zweiten Schauspieler eingeführt und dem Dialog die führende Rolle zugewiesen habe. Dann werden die Neuerungen des Sophokles besprochen (aus [202], S. 19)¹⁰⁹:

„Sophokles erhöhte die Zahl der Schauspieler auf drei und fügte Szenenmalerei hinzu.“

Damit scheint nun ausgemacht, dass die Skenographie mit den großen griechischen Tragödien in die Welt kam und dadurch eine frühe Form der perspektivischen Malerei einer breiten Öffentlichkeit bekannt wurde. Die Werke von Aischylos und Sophokles wurden in dem berühmten Dionysos-Theater am Südhang der Akropolis in Athen uraufgeführt. In diesen Anlagen hatten pro Aufführung zwischen 14.000 und 17.000 Zuschauern Platz (s. [203], S. 44), was auch aus heutiger Sicht eine unglaublich große Zahl ist. Ein modernes Theater bietet nur wenigen Tausend Zuschauern Platz. Die Metropolitan Opera in New York verfügt über 3800 Plätze, die Deutsche Oper in Berlin gar nur über 1860 Plätze. Da die gesamte Einwohnerzahl im Athens im 5. Jhd. vermutlich nicht mehr als 30.000 Bürger betrug (s. [204], S. 230), kann man davon ausgehen, dass ein Großteil der Bevölkerung den Aufführungen beigewohnt hatte und so auch in den Genuss der Skenographie kam.

¹⁰⁹In Butchers engl. Übersetzung kommt das Wort Skenographia zwar nicht vor („Sophokles raised the number of actors to three, and added scene painting“), im griech. Text jedoch sehr wohl ([202], S. 18, am Ende des 13. Absatzes).

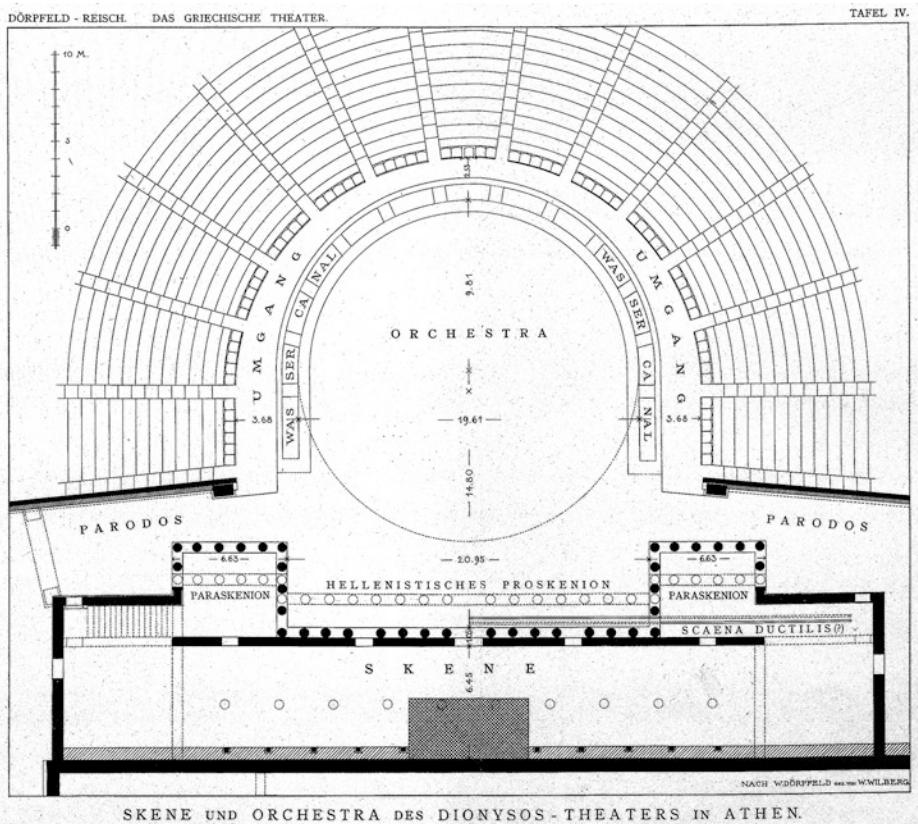


Abb. 2.31 Skene und Orchestra des Dionysos-Theaters in Athen, Wilhelm Dörpfeld und Emil Reisch (1896) aus [203] Tafel IV

Was verbirgt sich aber hinter der Bezeichnung? Schauen wir uns das Dionysos-Theater doch einmal etwas genauer an. Für die Aufführung der Stücke wurde ein möglichst realistischer Spielort benötigt – das Spielhaus, griechisch „Skene“. Um die verschiedensten Umgebungen darzustellen (z. B. das Felsgebirge im „Prometheus“ oder die Höhle im „Philoktetes“) musste die Vorderseite des Spielhauses dem Thema angepasst werden. Dazu waren Szenenmaler wie Zeuxis oder Agatharchos erforderlich, die entsprechend realistisch wirkende Landschaften zu den entsprechenden Kulissen hinzufügten, um die Zuschauer in die Illusion des jeweiligen Aufzugs zu versetzen. Ob diese Darstellungen bereits perspektivischer Natur waren, ist umstritten. Vermutlich aber wird man versucht gewesen sein, auf dem Spielhintergrund eine realistische Umgebung darzustellen (s. a. [203], S. 211–212). Wie die Skene des Dionysos-Theater ausgesehen haben mag, wurde von Dörpfeld und Reisch rekonstruiert (s. Abb. 2.31).

Die Maler dieser Zeit verstanden sich vortrefflich auf die Nutzung von Licht, Schatten und Farben und malten Bilder, die beim Betrachter angenehme Empfindungen wie beim natürlichen Sehen auslösten, wie Cicero mitteilt (aus [205], S. 327):

„Ebenso erhalten wir vermittelst der Augen fast unzählige angenehme Empfindungen, und obgleich die Gegenstände, die unser Auge berühren, sehr unähnlich sind, so ist es doch immer derselbe Sinn, der uns das Vergnügen gewährt. ... Die Kunst und Geschicklichkeit des Mahlens ist nur Eine; aber so unähnlich auch Zeuxis, Aglaophon und Apelles einander sind: so kann man doch keinem von ihnen in der Kunst eine Mangelhaftigkeit vorwerfen.“

Von keinem der Künstler sind Gemälde erhalten geblieben und doch wurde ein Bild des Apelles bis in unsere Zeit überliefert. Lukian erzählte in seiner Schrift „Die Verläumdung“ von dem Unheil, das von der Verleumdung ausgeht und illustriert dieses Ungemach an einem Gemälde, welches Apelles aus Ephesos angefertigt hatte ([206], S. 1441–1459). Apelles war von einem Rivalen, dem Maler Antiphilos, bei König Ptolemaios IV. verleumdet worden, er wäre Teil des Verrates von Theodotos zu Tyrus¹¹⁰ gewesen. Ptolemaios schäumte vor Wut, wurde aber schließlich von einem der Gefangenen überzeugt, dass Apelles unschuldig sei. Ptolemaios schämte sich seines Zornes, schenkte Apelles 100 Talente¹¹¹ und machte Antiphilos zu seinem Leib-eigenen. Apelles verarbeitete dieses Geschehen in einem Gemälde, das Lukian wie folgt beschreibt:

„Auf der rechten Seite sitzt ein Mann mit langen Ohren, denen wenig fehlt, um für Midasohren gelten zu können: seine Hand ist nach der von ferne auf ihn zukommenden Verläumdung ausgestreckt. Neben ihm stehen zwei weibliche Gestalten, die ich für die Unwissenheit und das Mißtrauen halte. Von der linken Seite her nähert sich ihm die Verläumdung in Gestalt eines ungemein reizenden, aber erhitzten und aufgeregten Mädchens, deren Züge und Geberden Wuth und Zorn verrathen: in der linken hält sie eine brennende Fackel; mit der rechten schleppt sie einen jungen Mann bei den Haaren herbei, der die Hände gen Himmel emporhält und die Götter zu Zeugen anruft.“

Vor ihr her geht ein bleicher, häßlicher Mann mit scharfem Blicke, der ganz aussieht, als ob ihn eine lange Krankheit abgezehrt hätte, und den wohl Jeder für den Neid erkennen wird. Hinter her gehen zwei weibliche Gestalten, welche der Verläumdung zuzusprechen, und sie herauszuputzen und zu schmücken scheinen: diese sind, wie mir der Ausleger des Gemäldes sagte, die Arglist und die Täuschung. Ganz hinten folgt eine trauernde Gestalt in schwarzem zerissenem Gewande, die Reue nämlich, die sich weinend rückwärts wendet, und verschämte Blicke auf die herannahende Wahrheit wirft.“

¹¹⁰Die Geschichte dazu kennt Polybios ([207] 5. Buch, 9. Kap.): Theodotos hatte im vierten syrischen Krieg, in dem sich der Seleukide Antiochos III. und der Ägypter Ptolemaios IV. gegenüberstanden, dem Antiochos die Städte Tyros und Ptolemais sowie eine Flotte von 40 Schiffen kampflos übergeben. Dafür ernannte ihn Antiochos zum Oberbefehlshaber der seleukidischen Armee.

¹¹¹Nach Klein ([208], S. 88) hatte ein Talent ein Gewicht von ca. 26 kg. Das wäre für 100 Silber-Talente nach heutigem Wert ein Schmerzensgeld von mehr als einer Million Euro.



Abb. 2.32 Die Verleumdung des Apelles, Sandro Botticelli (um 1495), aus The Yorck Project (2002) 10.000 Meisterwerke der Malerei (DVD-ROM)

Nach Lukians Beschreibung hatte Botticelli zwei Jahrtausende später „Die Verleumdung des Apelles“ gemalt. Lukians Beschreibung ist hier wortwörtlich ungesetzt (Abb. 2.32).

Bemerkenswert ist die Farbgebung der umgebenden Architektur. Die Reliefs sind hier einfarbig gehalten und scheinen sich dabei an einen antiken, monochromatischen¹¹² Stil anzulehnen. Als eifriger Anwender dieses Stils gilt eigentlich Zeuxis¹¹³, daher vermutet der Kunsthistoriker Zöllner, Botticelli könnte einer fehlerhaften Übersetzung des Plinius aufgesessen sein ([210], S. 103).

Der Wettstreit der Maler

Im fünfunddreißigsten Buch seiner Naturgeschichte berichtet Plinius von einem Wettstreit zwischen den Malern Zeuxis und Parrhasius (aus [209], S. 133):

„Letzterer [Parrhasius] soll sich mit Zeuxis in einen Wettstreit eingelassen haben; Zeuxis habe nämlich Weintrauben so treffend gemalt, dass die Vögel der Schaubühne zugeflogen

¹¹²Plinius schreibt dazu (in [209], S. 116) „...man habe anfangs den Schatten eines Menschen mit Linien umzogen, der zweite Schritt sei dadurch geschehen, dass man nur jedesmal eine Farbe angewandt habe, dies Verfahren sei, nachdem es mehr ausgebildet worden, die Monochromatik genannt, und eben dieser Kunstzweig besteht noch bis auf den heutigen Tag.“

¹¹³s. z. B. Plinius ([209], S. 133) „Er machte auch Stücke von einer Farbe und zwar in Weiss.“

wären, Parrhasius aber einen so natürlich gemalten leinenen Vorhang aufgestellt, dass Zeuxis, durch das Urtheil der Vögel stolz gemacht, endlich darauf gedrungen sei, den Vorhang zu entfernen und das Gemälde zu zeigen; als er nun seinen Irrthum eingesehen, soll er aus aufrichtiger Scham sich für besiegt gehalten und gesagt haben, er habe Vögel, Parrhasius aber ihn, den Künstler, getäuscht.“

Hier findet sich wieder die Idee der künstlichen Realität: Die Vögel halten Zeuxis' Weintrauben für real, dieser konnte die Malerei des Parrhasius nicht von der Wirklichkeit unterscheiden.

Die überzeugende Realität der Malerei wurde dabei vielleicht auch mit den Mitteln der Geometrie erreicht. Zumindest wird Pamphilos, ein Lehrer des Apelles, von Plinius mit seiner Ansicht zur Verquickung von Kunst und Wissenschaft zitiert (aus [209], S. 136):

Er [Pamphilus] war von Geburt ein Macedonier, aber der erste Maler von umfassender wissenschaftlicher Bildung, namentlich in der Arithmetik und Geometrie, ohne welche man es, seiner Ansicht nach, in der Kunst nie weit bringen könne...

Auch ohne geometrische Kenntnis der Projektion wurden in dieser Zeit erste Kunstwerke mit den Mitteln der optischen Abbildung erschaffen. Plinius berichtet vom Töpfer Dibutades, dessen Tochter den Schatten des Geliebten auf einer Wand nachzeichnete (aus [209], S. 158, s. a. Abb. 2.33):



Abb. 2.33 Dibutades Tochter zeichnet ihren Liebhaber, Joachim von Sandrat (1774) aus [211] Tafel A, unten

„Diese Kunst, aus Erde und Thon Aehnlichkeiten zu formen, erfand zu Corinth der Töpfer Dibutades aus Sicyon mit Hülfe seiner Tochter; letztere war nämlich in einen jungen Mann verliebt und malte, als derselbe in die Fremde ging, den Schattenriss seines Gesichts bei Licht mit Linien an eine Wand, der Vater belegte den Umriss mit Thon, erhielt dadurch einen Abdruck...“

Sandart fügt zu dieser historischen Liebesgeschichte noch die Legende des Gyges hinzu ([211], S. 11), der seinen eigenen Umriss, den das Feuer an der Wand warf, mit Kohle nachzeichnete¹¹⁴.

Obwohl die Ideen des Gyges oder der Familie Butades gemeinhin als der Beginn der Zeichenkunst gelten, ist es eigentlich eine simple Form der Schattenprojektion. Damit wird der Umriss eines Objektes mittels einer starken Lichtquelle auf einer Projektionsfläche abgebildet. Diese Schattenmalerei („Skiagraphie“) war ein einfaches Umzeichnen des Schattens auf einer Fläche. „Der Schatten erzeugt durch's Licht Malerei.“ ([213], S. 135).

Insgesamt kann man nun bemerken, dass die theatralische Perspektive zunehmend mit den Augen der Projektion betrachtet wurde. Dabei findet sich die Perspektive hauptsächlich als Dekorationsmalerei zur Ausgestaltung repräsentativer Villen. Viele dieser Kunstwerke lassen sich heute nur deshalb noch bewundern, weil sie Jahrhunderte durch den Ausbruch des Vesuvs im Jahre 79 verschüttet waren. Dabei wurden unter anderem die Orte Herculaneum und Pompeji von einer dicken Schicht aus Asche begraben und dadurch in dem damaligen Zustand konserviert. Gerade in Pompeji sind verschiedene dekorative Wandmalereien erhalten geblieben. Anhand dieser Funde konnte man die Malerei in vier Stile einteilen [214]. Da wäre zunächst der Inkrustationsstil (Mauerwerkstil) zu nennen, bei dem durch Malerei oder plastische Stuck-Arbeiten der Wand große Steinquader oder wertvolle Materialien imitiert wurden. Ein Beispiel dafür ist das Haus des Fauns in Pompeji (s. Abb. 2.34).

Der zweite Stil war insgesamt etwas aufwendiger. Hierbei wurde versucht, eine Scheinarchitektur aufzubauen und Ausblicke in virtuelle Landschaften zu simulieren. Konsequenterweise wird dieser Stil als Architekturstil bezeichnet. Der nachfolgende ornamentale Stil teilte die Wand in flächige Felder ein, die von verschiedenen Streifen umsäumt und mit Ornamenten, auch dekorativer Architektur, wie z. B. Säulen oder Simse, verziert sind. Der Ornamentik dieser Periode gibt dem 3. Stil seinen Namen: ornamentaler Stil bzw. Ornamentstil. Der 4. Stil ist der letzte pompejanische Stil, der mit dem Untergang Pompejis sein jähes Ende fand. Bei diesem Stil werden die dargestellten Architekturen durch Figuren und Handlungen belebt und mit zahlreichen Ornamenten und Girlanden geschmückt.

¹¹⁴Die Geschichte geht aber vielleicht einfach auf eine fehlerhafte Lesart des Plinius zurück, wie Schürer ausführt. Gyges wird dort als Erfinder des Ballspiels, nicht der Malkunst aufgeführt (s. [212], S. 203).



Abb. 2.34 Inkrustationsstil Casa del Fauno, August Mau (1882), aus [214] Tafel I

Ein wunderbares Beispiel dieser Periode ist die Malerei des Tablinums¹¹⁵ aus dem Casa di Apollo in Pompeji. Im Tablinum wird die Geschichte des Wettstreits zwischen Apollon und dem Satyr Marsyas erzählt, bei dem Marsyas auf der Flöte der Athene spielte und Apollon auf seiner Lyra ([215], S. 85–86). Apollon, der zu seinem Spiel noch Gesang hinzufügte, wurde zum Sieger gekürt. Dem unterlegenen Marsyas zog Apollon bei lebendigem Leibe die Haut ab.

Der unerfreuliche Ausgang dieses Wettbewerbs soll hier nicht weiter thematisiert werden. Die Malerei dient hier lediglich als Illustration für die tatsächliche Nutzung der Perspektive im römischen Reich. Das Bild ist als Überlagerung zweier Bilder dargestellt. Zunächst wurde eine fotografische Aufnahme verwendet, die das Wandbild im heutigen Zustand zeigt. Diese Aufnahme wurde mit einer Zeichnung von Mastracchio überblendet, die dieser während der Ausgrabungen in Pompeji angefertigt hatte [216]. Mastraccios¹¹⁶ Zeichnung wiederum diente Blazeby am Kings College in London im „Skenographia Project“¹¹⁷ [218] als Basis für eine Analyse der im Bild enthaltenen Fluchtpunkte, mit der schließlich das gesamte Bild überlagert wurde (s. Abb. 2.35).

¹¹⁵In einem römischen Haus ein repräsentativer Raum, der sich ans Atrium anschloss und üblicherweise dem Eingang gegenüber lag.

¹¹⁶Michele Mastracchio war Zeichner bei den Ausgrabungen in Pompeji und fertigte viele Zeichnungen der Wandgemälde an, die den damaligen Zustand kurz nach der Ausgrabung repräsentieren.

¹¹⁷„The Skenographia Project: Investigating Roman Wall Paintings through Digital Visualisation“ [217].

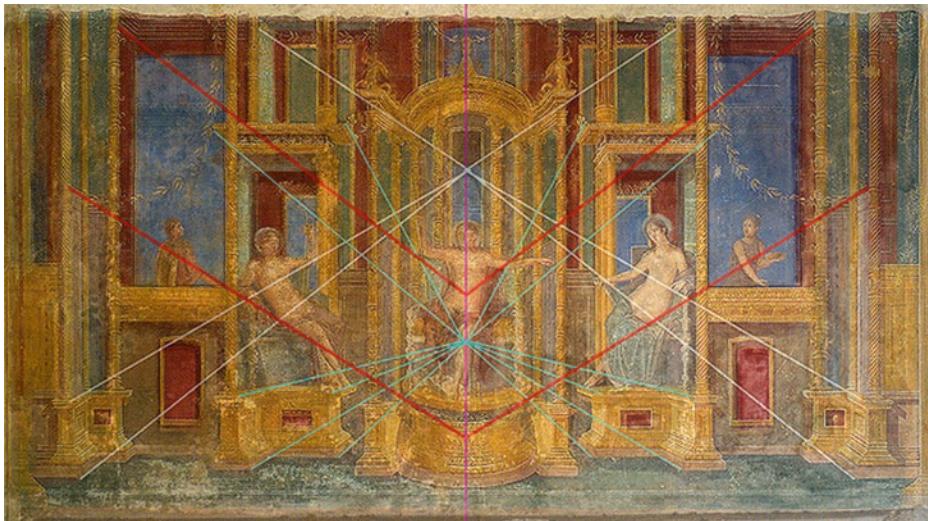


Abb. 2.35 Architekturstil im Casa di Apollo, Überblendung von Fotografie und Analyse, Michele Mastracchio (1847), Martin Blazeby (2007), Mentnafunangann (2014), Grasnick (2019)

Die Überlagerung des Wandgemäldes mit den Perspektivlinien offenbart die gleichzeitige Verwendung mehrere Fluchtpunkte, die auf einer vertikalen Symmetrieachse (im Bild Magenta) liegen. Die weißen Linien des oberen Fluchtpunktes beziehen sich hauptsächlich auf die äußereren Bildteile, die dadurch wie aus größerer Höhe aufgenommen scheinen. Die hellblauen Linien bilden die maßgebliche Zentralperspektive des wichtigen Bildteils in der Mitte. Zudem zeigen die roten Linien eine zusätzliche Verwendung eine Parallelperspektive. Bei flüchtiger Betrachtung erscheint eine derartige multiperspektivische Malerei mit heutiger Kenntnis unrichtig, allerdings darf man hierbei nicht die Größe des Bildes unterschätzen. Da die Malerei die gesamte Wand einnahm, hatte ein Betrachter vermutlich nicht beständig die Möglichkeit, das gesamte Bild zu erfassen, sondern lediglich Bildteile und damit eine einzige Perspektive. Eine andere Erklärung der Existenz mehrerer Fluchtpunkte auf einer Vertikalachse ist die Fischgrätentheorie von Panofsky [219]. Bei Verwendung eines Projektionskreises anstelle einer Projektionsfläche und dessen anschließender „Abrollung“ auf einer planen Wand erhielte man ein Bild mit mehreren Projektionszentren. Allerdings verweist auch schon Panofsky auf die Tatsache, dass die erhaltenen perspektivischen Bilder „... wohl ausnahmslos überhaupt nicht streng konstruiert sind“ ([219], S. 106).

Die Qualität der römischen Malerei zu Beginn der christlichen Zeitrechnung soll abschließend an einem Beispiel aus Herculaneum¹¹⁸ gezeigt werden. Die Zeichnung zeigt die vorzügliche perspektivische Abbildung eines (vermutlich irrealen) Kandelabers (Abb. 2.36).

¹¹⁸Römische Stadt am Golf von Neapel, im Jahre 79 beim Ausbruch des Vesuvs verschüttet.

Abb. 2.36 Herculaneum.
Ornamente in Farben,
Candelaber, Wilhelm Zahn
(1842) aus [220], III. Heft.
Tafel 25



Die Skenographie war in griechischer Zeit ein wichtiges Element der Theaterkultur und wurde später zu einem Teil der römischen Architektur. Ein durch den bayerischen König Ludwig I. initierter Nachbau mit zahlreichen Wandmalereien ist das Pompejanum in Aschaffenburg [221].

Dem Damianos verdanken wir eine Beschreibung der Skenographie aus der Sicht der Spätantike. Damianos teilt die Optik in die eigentliche Optik, die Katoptrik und Skenographie ein und fragt schließlich „Was ist Skenographie?“. Die Antwort gibt Damianos selbst (in [222] ab S. 29):

„Der skenographische Theil der Optik fragt, wie man die Ansichten von Gebäuden zu zeichnen hat. ... Denn die Aufgabe des Architekten ist, sein Werk in den Verhältnissen wohlgefällig für die Erscheinung und soweit möglich für die Täuschungen des Auges Heilmittel ausfindig zu machen und nicht nach der wirklichen, sondern nach der für das Auge als erscheinenden Gleichheit und Wohlgefälligkeit der Verhältnisse zu streben.“

Damianos erläutert, dass zuweilen ein Kreis als Ellipse oder ein Quadrat als gestrecktes Viereck zu zeichnen sei, um für den Anblick wohlgefällig zu sein. Damit ist nicht anderes gemeint, als das die zweidimensionale Zeichnung eines dreidimensionalen Gebäudes dem entsprechen sollte, wie es im Realen gesehen würde. Dies ist die prinzipielle Beschreibung der Perspektive.

Ob mit diesen Angaben bereits die Konstruktion einer echten Zentralperspektive möglich war, darf bezweifelt werden. Sicher ist jedenfalls, dass die Projektion einer Kugelfläche auf eine plane Fläche zu dieser Zeit bekannt war. Ptolemäus beschreibt in seinem „*Planisphaerium*“ eben diesen Sachverhalt [223]. In der lateinischen Ausgabe des *Planispheriums* von 1558 verweist der Übersetzer und Herausgeber Commandino auf die Zentralprojektion (s. S. 6 des Kommentars von Commandino im *Planisphaerium* [224]). Diese Projektion der Kugelfläche auf eine Ebene hatte als stereografische Projektion Bedeutung in der Kartografie.

Die Skenographien des Agatharchos und seiner Zeitgenossen stellen vielleicht den Beginn der wissenschaftlichen Perspektive dar [225]. Die Schriften des Euklid oder des Ptolemäus geben geometrische Anleitung zur Erstellung korrekter Zeichnungen. Das Grundwissen zur Erstellung perspektivischer Zeichnungen scheint bis in die Spätantike vorhanden gewesen zu sein, wie erhaltene Wandmalereien aus spätromischer Zeit und nicht zuletzt die Bücher des Vitruv belegen.

Mit dem Übergang von der späten Antike zum frühen Mittelalter setzte ein Prozess des Vergessens von Wissen ein, der durch die bedeutenden Bücherverluste der Spätantike für lange Zeit zementiert wurde. Schriftkundige Mönche vervielfältigten und übersetzten jedoch die Werke des Vitruv¹¹⁹, Euklid oder Ptolemäus und bewahrten damit das Wissen vor der vollständigen Vernichtung¹²⁰. Die Umsetzungen der perspektivistischen Ideen der alten Griechen und Römer gelang den Mönchen vielleicht auch deshalb noch einigermaßen, wie zum Beispiel die Wandbilder aus der Kirche St. Georg in Oberzell auf der Insel Reichenau zeigten [228].

2.5 Projektionen aus dem Mittelalter

Die Renaissance der Perspektive

Der Begriff „Renaissance“ ist ein Lehnwort aus dem Französischen und meint „Wiedergeburt“. Und tatsächlich beginnt ab dem 14. Jahrhundert in Italien die Wiederentdeckung

¹¹⁹Reginbert (Bibliothekar des Klosters Reichenau) erwähnt in einer Aufstellung bezüglich der zur Amtszeit des Abtes Ruadhelms (838–842) verfassten Bücher auch Vitruv: „Item Liber Vitruvii magistri de Architectura comprehensa X. libris.“ [226]

¹²⁰Die Bayerische Akademie der Wissenschaften hat dazu ein Projekt „Mittelalterliche Bibliothekskataloge Deutschlands und der Schweiz“ aufgesetzt, in dem die damals vorhandenen Schriften insgesamt katalogisiert werden [227].

Abb. 2.37 Troiza

(Dreifaltigkeitsikone), Andrej Rubljow (1411) heute in der Tretjakow-Galerie in Moskau, aus The Yorck Project (2002)



der Antike in Kunst und Wissenschaft. Vasari nutzte diese Bezeichnung¹²¹ in seinen Lebensbeschreibungen berühmter Künstler „Le Vite“¹²², um den Fortschritt und die Wiedergeburt der Malerei, Bildhauerei und Architektur zu kennzeichnen.

Die Form der Abbildung hatte sich nach Zerfall des römischen Reiches und der zunehmenden Ikonisierung der bildenden Kunst im Gefolge der Christianisierung Europas verändert. Die realistische, perspektivische Darstellung war aus den Bildern verschwunden und wurde durch eine flächenhafte Malerei ersetzt. Das wird besonders bei der Ikonenmalerei deutlich, bei der die Perspektive nicht nur einfach verschwindet, sondern zum Teil sogar durch eine umgekehrte Perspektive¹²³ ersetzt wird. Dabei liegt der Fluchtpunkt vor dem Bild auf der Betrachterseite, wodurch sich mittels der unrealistisch betonten „falschen“ Darstellung eine symbolhafte Überbetonung der verehrungswürdigen Charaktere einstellen sollte (s. Abb. 2.37).

¹²¹ Ital. „rinascita“.

¹²² Im ital. Original von 1550 „Le vite de piu eccellenti architetti, pittori, et scultori italiani, da Cimabue insino a' tempi nostri“ [229], die aktuelle deutsche Gesamtausgabe umfasst 45 Bände [230].

¹²³ s. a. Pawel Florenskis „Die umgekehrte Perspektive“ [231].

Diese Form der Darstellung war im Mittelalter als byzantinische Malerei¹²⁴ verbreitet. Wie insgesamt die Philosophie und Wissenschaften, rückte auch die reale optischen Abbildung ins Interesse der Gelehrten des frühen Mittelalters. Die Schriften des Vitruv, Euklid und Ptolemäus hatten ihren Weg aus der Antike bis ins Italien der Renaissance genommen. Neben den erhaltenen griechischen und römischen Werken der Antike wurden nun auch arabische Schriften ins Lateinische übertragen. Um diese Zeit wurde Alhazens „Schatz der Optik“ aus dem Arabischen¹²⁵ übersetzt und es scheint, dass diese Übersetzung einen großen Einfluss auf die gelehrtene Optiker dieser Zeit hatte.

Peckhams „Perspectiva communis“ [234], Witelos „Peri Optices“¹²⁶ [54] und auch Bacons „Perspectiva“ [235] deuten auf die Kenntnis von Alhazens Optik hin. In all diesen, in der Folge einflussreichen Werken, wird neben der Optik und dem Sehvorgang auch die Perspektive geometrisch analysiert.

Die Renaissance begann bei Vasari mit Cimabue, dem Entdecker und Lehrer Giottos. Giotto war wiederum derjenige Maler, der in seinen Bildern den Realismus durch die Nutzung perspektivischer Elemente erhöhte. Auf diese Weise ist die Renaissance mit der Wiedergeburt der Perspektive verknüpft.

Es ist nicht überliefert, ob Giotto, der nach der Legende aus einfachen Verhältnissen stammte, die alten Schriften kannte. Unbestritten ist, dass sich das Werk des Giotto über seine Vorgänger erhaben und eine neue Qualität der Malerei einläutete.

Die Legende von Giottos Kindheit

Der Bildhauer und Schriftsteller Ghiberti trug mit einer Erzählung zur Legendenbildung um Giottos Herkunft im zweiten Buch seiner Kommentare ([236], S. 35). Dort erzählt Ghiberti die Geschichte von Giottos Entdeckung (in dt. Übersetzung nach Schwarz aus [237], S. 14):

„Die Kunst der Malerei begann ihren Aufstieg in Etrurien: In einem Dorf nahe Florenz mit Namen Vespniano wurde ein Knabe voll wundersamer Begabung geboren. Einmal zeichnete er nach der Natur ein Schaf. Da kam der Maler Cimabue des Weges auf der Straße, die nach Bologna führt, und fand das Kind auf der Erde sitzen, wie es gerade auf einer Steinplatte das Schaf zeichnete. Er verwunderte sich aufs höchste, daß es in so zartem Alter so Gutes zustande bringe. Während er wohl sah, daß es seine Gabe aus den Händen der Natur selbst empfangen hatte, fragte er es nach seinem Namen. Es antwortete: ‚Ich werde Giotto gerufen. Mein Vater heißt Bondone und wohnt in dem Hause hier nebenan.‘ Da ging Cimabue mit Giotto zum Vater und wurde gut aufgenommen. Er erbat sich den Knaben von ihm. Und da der Vater sehr arm

¹²⁴Eine praktische Anleitung zur Malerei des 12./13. Jhdts. im Stile des Ikonenmalers Manuel Panselinus wurde von dem griechischen Mönch Dionysios von Phourna auf dem Berge Athos verfasst [232].

¹²⁵Nach Lindberg zum Ende des 12. Jhdts./Anfang des 13. Jhdts. (aus [157], S. 209). Für die mitunter geäußerte Vermutung, Gerhard von Cremona (1114–1187) sei der Übersetzer gewesen (s. z. B. [233], S. 35), fehlt der endgültige Beweis ([157], S. 210).

¹²⁶Als Handschrift aus dieser Zeit erhalten, aufbewahrt in der Biblioteca Apostolica Vaticana [53].

war, übergab er ihn an Cimabue. Dieser nahm ihn mit sich, und so wurde Giotto der Lehrling Cimabues. Dieser hielt noch an der alten griechischen Weise fest und genoß darin großes Ansehen in Etrurien. Giotto aber machte sich zu einem Großen in der Kunst der Malerei.“

Die Geschichte weist auf einen wichtigen Aspekt der Renaissancemalerei hin. Die Beschäftigung mit der Natur und deren möglichst realistische Abbildung wurde wieder bedeutsam.

Ein zweiter Punkt ist die gesellschaftliche Perspektive. Im Mittelalter waren die Möglichkeiten für einen sozialen Aufstieg eher gering und die Chancen jedes Einzelnen vor allem durch den Geburtsstand geprägt. Giotto hatte es in seinem Leben nur durch Talent vom einfachen Landkind zum anerkannten, wohlhabenden Bürger gebracht, der mit Dante¹²⁷ Umgang pflegte und von Boccaccio gerühmt wurde¹²⁸.

Giotto überwand also schließlich die Grenzen der byzantinischen Malerei und etablierte wieder eine naturgetreue Abbildung mit lebhaften Farben und realistischer Perspektive (Abb. 2.38).

Die hohe Abbildungstreue der dargestellten Personen und Architektur war bei Giotto durch aufmerksame Beobachtung entstanden. In die Gemälde der jüngeren Lorenzettis ist zudem die Kenntnis der römischen Republik eingeflossen, wie am Beispiel des Freskenzyklus „Über die gute und die schlechte Regierung“¹²⁹ gezeigt werden kann. Aus zeichnerischer Sicht sind besonders die Darstellungen der Gebäude interessant. Die Stadt wird perspektivisch dargestellt, wenngleich die Gebäude offensichtlich nicht per Fluchtpunkt konstruiert, sondern vermutlich möglichst genau nach der Realität gemalt sind. Im Prinzip ist diese Art der Malerei, die perspektivisch wirkt, aber irgendwie nicht korrekt konstruiert zu sein scheint, in der Malerei des 14. Jahrhunderts recht verbreitet¹³⁰.

¹²⁷Dante erwähnt Giotto im 11. Gesang der göttlichen Komödie (das Fegefeuer): „Erst glaubte Cimabue das Feld zu halten/Im Malen; nun wird Giotto ausgerufen,/Daß Jenes Ruf dadurch verdunkelt worden.“ (aus [238], S. 183)

¹²⁸Im Dekameron (Sechster Tag. Fünfte Geschichte.) gibt Boccaccio ein Gespräch zwischen Giotto und Forese wieder und leitet die Anekdote mit einem Loblied auf Giotto ein. „Der Name des Anderen war Giotto, und mit so vorzüglichen Anlagen war er begabt, daß die Natur, ... nichts hervorbringt, das er nicht mit Griffel, Feder oder Pinsel dem Urbilde so ähnlich darzustellen gewußt hätte, daß es nicht als ein Abbild, sondern als die Sache selbst erschienen wäre; weshalb denn der Gesichtssinn der Menschen nicht selten irre geleitet ward und für wahr hielt, was nur gemalt war.“ (aus [239], S. 217)

¹²⁹Das Fresko wurde im Auftrag der republikanischen Regierung von Siena für den Palazzo Pubblico angefertigt (dort kann es noch betrachtet werden [240]) und demonstriert das stadt-republikanische Weltbild der Stadtväter Sienas. Die Bildinhalte lassen auf Kenntnis der römischen Geschichte (zumindest bei den Auftraggebern) schließen (vgl. „Der Freskenzyklus von Ambrogio Lorenzetti über die gute und schlechte Regierung“ [241]).

¹³⁰Z. B. bei Taddeo Gaddi im Fresko „Presentazione della Vergine al tempio e Sposalizio della Vergine“ der Cappella Baroncelli oder bei Maso di Banco (gest. 1348) im Fresko „Miracolo del santo che chiude la fauci al drago e resuscita due maghi uccisi dall’alito del mostro“ der Cappella Bardi di Vernio (beide Bilder finden sich in der Basilica di Santa Croce in Florenz).

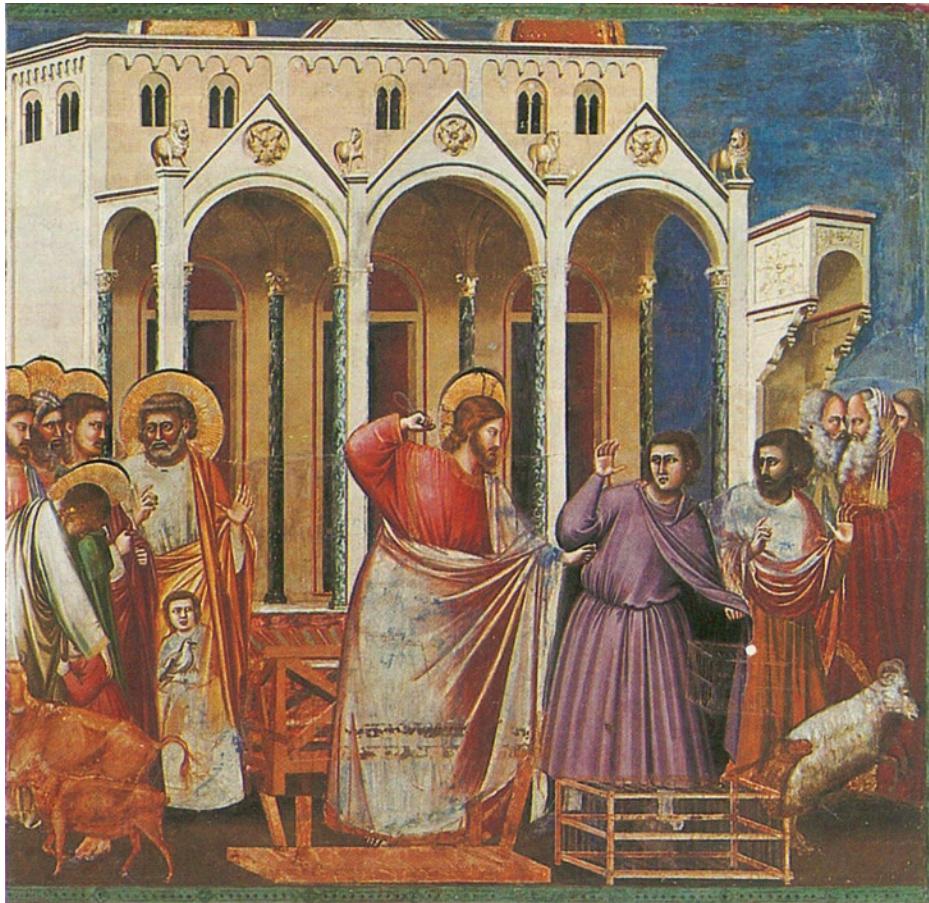


Abb. 2.38 Die Vertreibung der Händler aus dem Tempel, Freske in der Arenakapelle in Padua, Giotto di Bondone (1304–1306), [Zeno.org](#)

Der Übergang vom späten gotischen Stil der Malerei¹³¹ zur frühen Renaissance wurde unter anderem durch die realistische Naturmalerei Pisanellos oder Fabrianos geprägt. Im Codex Vallardi¹³² finden sich verschiedene Studien, die den Versuch Pisanellos illustrieren, Pflanzen, Tiere und Menschen möglichst naturgetreu darzustellen. Fabrianos

¹³¹ Wobei weder die realistische noch die perspektivisch korrekte Abbildung, sondern maßgeblich die religiöse Perspektive des Motives als bedeutungsstiftendes Element im Fokus stand.

¹³² lt. Zoëge v. Mateuffel (s. [242], S. 53, Anmerk. 1) wurde der Codex i. J. 1856 v. Vallardi fälschlicherweise als Sammelband da Vincis (s. a. Vallardis Katalog v. 1855 [243]) an den Louvre verkauft und dort 1996 ausgestellt [244].

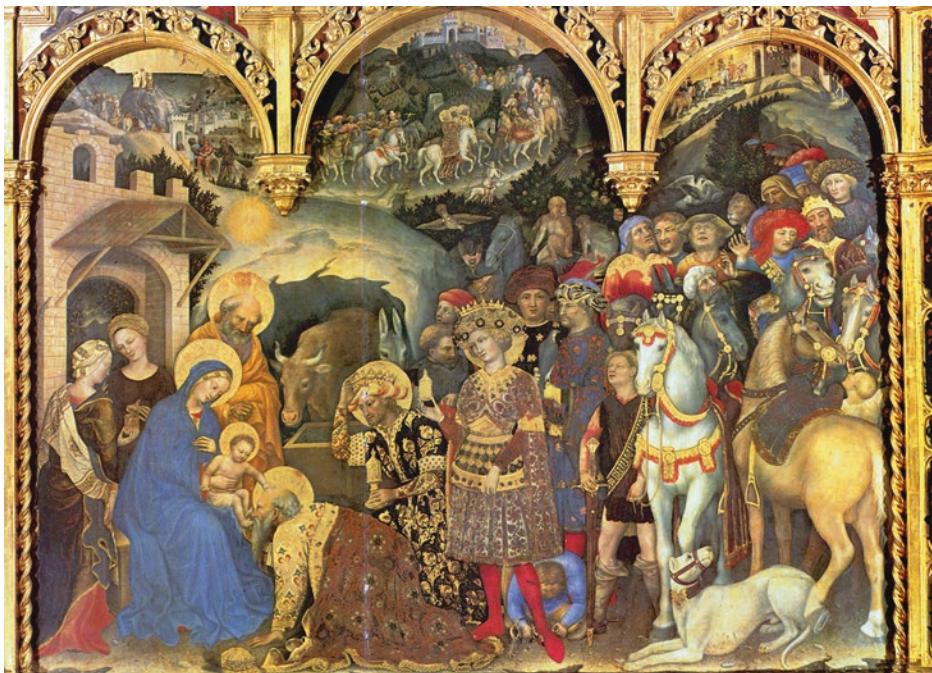


Abb. 2.39 Adorazione dei Magi, Gentile da Fabriano (1423), Gli Uffizi Florenz, aus The Yorck Project (2002)

Altar-Bild „Die Anbetung der Könige“ wirkt beinahe wie eine Umsetzung von Pisanellos Skizzen in ein echtes Gemälde. Tiere und Menschen sind vortrefflich und zum Teil in natürlicher Bewegung dargestellt¹³³ (Abb. 2.39).

Als „Paters der Renaissance“ bezeichnete Dvořák die italienischen Künstler Masaccio, Brunelleschi und Donatello (in [246], S. 45). Donatello, der als junger Bildhauer dem Ghiberti in dessen Werkstatt assistierte, hatte den Stil der römischen Antike ins beginnende 15. Jahrhundert katapultiert. Donatellos Plastiken wirken ungewöhnlich realistisch, die Darstellung von Haaren oder dem Faltenwurf der Kleider¹³⁴ ist für diese Zeit bahnbrechend. Donatello trieb den Naturalismus auf die Spitze. Sein splitternackter, junger David¹³⁵ steht, nur mit einem lorbeerbekränzten Hut bekleidet, lässig auf dem

¹³³Der goldene Rahmen, der auf dem Bild sehr realistisch wirkt, ist es auch: Er ist nicht gemalt, sondern geschnitten und gehört zum Altar der Familie Strozzi, heute in den Uffizien in Florenz [245].

¹³⁴z. B. in der Darstellung des Evangelisten Johannes oder des Propheten Habbakuk, genannt „Zuccone“ (im Museo dell’Opera del Duomo, Florenz, s. a. [247]).

¹³⁵Heute im Palazzo del Bargello in Florenz.

abgeschlagenen Haupt des alten Goliaths. Beinahe schockierend wirkt eine andere Skulptur Donatellos. Die büßende Maria Magdalena¹³⁶ hatte noch Jahrhunderte nach Ihrer Fertigstellung eine verstörende Wirkung auf den Lyriker Arndt. Auf seinen Reisen erblickte er in Florenz die Maria des Donatello, die in ihm ein „widerliches Gefühl“ erregte (aus [248], S. 135):

„Von ebendiesem Meister ist eine büßende Maria Magdalena aus Bronze, ein schönes Werk, so man ein anatomisches Lazarethstück haben will, zahn- und fleischlos, abgezehrt, von langen fliegenden Locken umhüllt.“

Brunelleschi arbeitete wie Donatello auch als Bildhauer und hatte ebenfalls eine büßende Magdalena angefertigt¹³⁷. Wichtiger, als diese ohnehin nur fragmentarisch überlieferte Tätigkeit, ist diejenige als Architekt. Brunelleschi reiste in Begleitung des Donatello nach Rom ([249], S. 29) um sich dort dem Studium der antiken Stätten zu widmen. Sein Augenmerk richtete er dabei auf antike Architektur. Beim Studium der römischen Ruinen reifte vielleicht der Wunsch in ihm die untergegangene antike Baukunst zu neuem Leben zu erwecken. Bei seiner Rückkehr nach Florenz ergab sich dazu Gelegenheit: Brunelleschi erhielt den Auftrag, gemeinsam mit Ghiberti die Kuppel der Kathedrale Santa Maria del Fiore, des Florentiner Doms, zu bauen. Die Fertigstellung dieses Bauwerkes allein zeigt schon Brunelleschis Meisterschaft. Erstaunlicher ist, was Manetti aus eigener Anschauung in „Vita di Filippo Brunelleschi“ [250] über Brunelleschi berichtet. In der Zeit Brunelleschis hatte die Malerei allein durch bloße Nachahmung der Natur einen erstaunlichen Realismus entwickelt und zu einem besseren Verständnis der Szenerie durch Anschauung geführt. Als Architekt und Kenner der Geometrie entwickelte Brunelleschi eine praktische Präsentation der Perspektive. Da diese erste Beschreibung einen wichtigen Schritt in der Entwicklung der mathematischen Perspektive darstellt, ist sie hier vollständig in Fabricczys deutscher Erklärung wiedergeben (aus [249], S. 46).

„Um nämlich das Resultat seiner Beobachtungen und Forschungen möglichst eindringlich und klar darzuthun, fertigte Brunelleschi in sorgfältigster farbiger Ausführung zwei Bilder. Er stellte darauf das Baptisterium mit dessen Umgebung, vom Hauptportal des Domes, – und den Palazzo de' Signori samt dem Platz, von der Ecke der Via die Calimara aus gesehen in perspectivischer Aufnahme dar. Damit die beabsichtigte Täuschung um so vollkommener erreicht werde, überdeckte er in der ersteren Tafel den Himmel mit poliertem Silber, worauf sich Luft und Wolken widerspiegeln. Sodann bohrte er an der Stelle des Augenpunktes ein linsengroßes Loch in die Tafel, das sich nach der Rückseite konisch erweiterte und stellte sie so vor einem Spiegel auf, dass ihre Entfernung davon, mit dem Massstab gemessen, den er für die bildliche Darstellung gewählt hatte, genau der Distanz entsprach, in welcher er sich bei der Aufnahme von dem Hauptgegenstande (dem Baptisterium) befunden hatte. Indem er auf diese Weise dem Beschauer, den er durch die Öffnung am Augenpunkte

¹³⁶Heute im Museo dell'Opera del Duomo in Florenz.

¹³⁷Die allerdings aus Holz war und daher im Jahre 1471 bei einem Brand vernichtet wurde ([249], S. 19).

blicken liess, die gehörige Entfernung für die Betrachtung des darin reproduzierten Bildes vorschrieb, war er dessen sicher, dass die Wahrheitstreue seiner Darstellung zur Geltung gelangen und Staunen erregen musste.

Fabriczys Text ist zugegebenermaßen nicht leicht verdaulich. Klar wird jedenfalls, dass Brunelleschi zwei Bilder in ausgezeichneter Qualität malte (von denen hier nur das erste betrachtet wird). Das Bild muss von vorzüglicher perspektivischer Qualität gewesen sein. Darauf war das Baptisterium San Giovanni (die Taufkirche des Doms von Florenz) dargestellt. In das Bild war ein Loch gebohrt, durch das man hindurchsehen konnte. Dieses Guckloch war konisch ausgeführt, um das Auge bequem anlegen zu können. Durch Heranziehung einer moderneren Übersetzung von Manettis Text wird klar, wie Brunelleschis Gerätschaft funktionieren sollte (aus [251], S. 116).

„Damit sich nun beim Betrachter kein Irrtum in der Wahl seines Standpunktes einschleichen konnte, wodurch der Augenschein verzerrt wurde, hatte er ein Loch in die Bildtafel gemacht, das auf dem Bild genau an der Stelle der Kirche von San Giovanni war, die dem Auge desjenigen gegenüberlag, der von der Stelle innerhalb der Mitteltür von Santa Maria del Fiore aus blickte, auf die der Maler sich beim Malen gestellt hatte. Und dieses Loch war klein wie eine Linse auf der bemalten Seite und erweiterte sich konisch nach hinten, wie der Strohhut einer Dame, auf die Größe eines Dukaten oder etwas mehr. Und er wollte, daß das Auge sich an die Rückseite lege, wo das Loch groß war, durch das er blicken sollte, und er sollte mit einer Hand das Auge abschirmen und mit der anderen sollte er einen ebenen Spiegel auf die andere Seite halten, in dem sich das Bild spiegeln sollte. Die Entfernung, in der der Spiegel mit der Hand ausgestreckt wurde, entsprach proportional ungefähr der wirklichen Distanz, von der aus er die Kirche von San Giovanni gemalt hatte. So daß, wenn man es betrachtete, es – zusammen mit den bereits erwähnten Umständen (dem polierten Silber, der Darstellung des Platzes, der genauen Zeichnung etc.) – schien, als sähe man die Wirklichkeit selbst. Und ich habe es in der Hand gehabt und habe es zu jener Zeit oftmals gesehen und kann davon Zeugnis ablegen.“

Nach Manetti (s. [251], S. 116) hatte die Bildtafel eine Größe von einem halben „Braccio“¹³⁸ im Quadrat, was etwa einer halben Armlänge oder der Höhe eine A4-Blatts entspricht. Das Bild konnte als bequem mit einer Hand vor das Auge gehalten werden, während mit der anderen Hand ein Spiegel vor das Bild gehalten wurde. Durch die Gucklöcher in Spiegel und Gemälde konnte ein Betrachter gleichzeitig das reale Objekt und die Spiegelung des Gemäldes betrachten (s. Abb. 2.40). Wenn der Betrachter an der Position stand, in der Brunelleschi das Gemälde angefertigt hatte, war, wie Manetti bezeugt, die Überdeckung zwischen Realität und Abbildung nahezu perfekt.

Da die Bildtafeln nicht erhalten geblieben sind, wurde diese frühe Form von „Mixed Reality“ nur in Textform übermittelt. Es ist nicht bekannt, wie Brunelleschi die Gemälde angefertigt hatte und ob er seine Zeichnungen konstruiert oder nur präzise nach der

¹³⁸Ein „braccio“ war die florentinische Elle mit 58,36 Zentimetern (das doppelte eines römischen Fußes, aus [249], S. 80, Fußnote 1) bzw. (nach [252]) S. 581 55,06 cm (für Leinwand) und 58,21 cm (für Wolle).

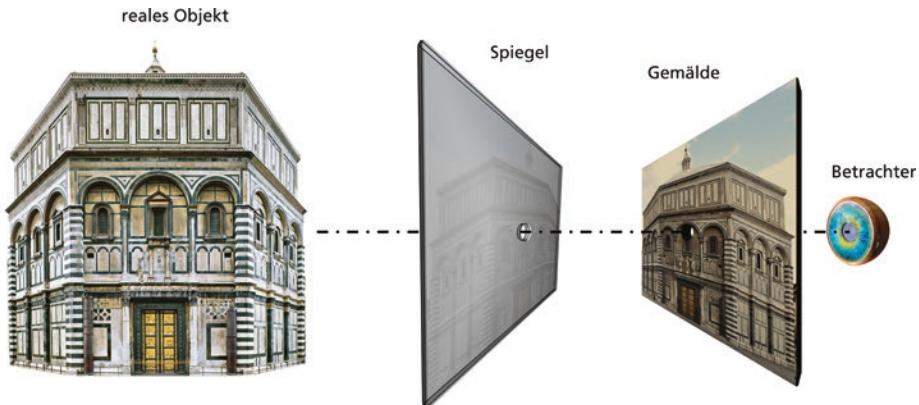


Abb. 2.40 Brunelleschis Experiment, Grasnick (2019)

Natur kopiert hatte. Jedenfalls wird Brunelleschi von seinen Biografen Manetti und Vasari die Fähigkeit zugeschrieben, aus dem Grundriss und Aufriss eines Gebäudes dessen perspektivische Darstellung zu ermitteln – was die zumindest die geometrische Kenntnis der Erzeugung eines Schrägbildes aus der Zweitafelprojektion voraussetzt.

Die erste dokumentierte Beschreibung der Konstruktion einer Perspektive fertigte Alberti im Jahre 1435, also noch zu Lebzeiten Brunelleschis, an. Alberti war mit Brunelleschi und Donatello befreundet und widmet dem „bewundernswerten Genius“ Brunelleschi seine drei Bücher über die Malerei [253]. Das erste Buch widmet sich dem Wesen der Malerei aus mathematischer Sicht. Die Abhandlung beginnt mit der Definition eines Punktes als kleinstes darstellbares Zeichen. Mehrere Punkte verbinden sich zu einer Linie und mehrere Linien, ineinander gewebt wie bei einem Leinengewebe¹³⁹, ergeben eine Fläche. Alsdann spricht Alberti den Flächen, die durch Änderung der Begrenzungslinien (Saum) nicht nur die Gestalt, sondern auch den Namen ändern: „...was man Dreieck nannte wird man jetzt Viereck oder Vieleck nennen.“ (aus [253], S. 54). Diese Flächen müssen dabei nicht zwangsläufig plan sein, sondern können durchaus auch sphärisch oder konkav und sogar aus verschiedenen Flächen zusammengesetzt werden. Die Form der Fläche nennt er den „Rücken“ und kann so ein beliebiges Objekt aus verschiedenen Flächen zusammensetzen, die über die Eigenschaften „Saum“ und „Rücken“ definiert werden. Alberti erkennt, dass die Wahrnehmung der Gestalt einer Fläche mit dem „Sehvermögen“, also der durch die Änderung der Position des Betrachters veränderten Gestalt oder Farbe der Fläche, zusammenhängt.

Alberti teilt die Farben nach den Elementen ein und kommt so auf vier: Rot für das Feuer, Blau für die Luft, Grün für das Wasser und Grau für die Erde. Durch Beimischung von Schwarz oder Weiß und Mischung der Farben kann man alle Farben erzeugen und

¹³⁹Gewebe aus den Fasern des Flachs (Lein).

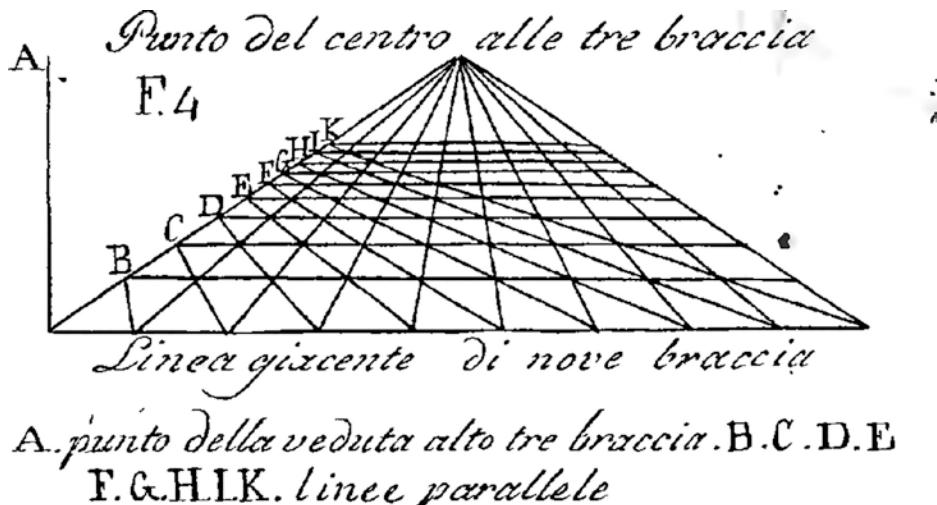


Abb. 2.41 Distanzpunktkonstruktion der Perspektive, Ferrario Giusti (1804) aus [255] Anhang, Fig. 4

beliebige Abstufungen erzeugen. Das ist erstaunlich gut beobachtet und im Prinzip bis heute gültig. Ein aktueller Bildschirm erzeugt alle Farben des Bildes allein aus den Grundfarben Rot, Grün und Blau sowie dem jeweiligen Schwarzwert (der Helligkeit).

Wenn Alberti dann die Sehstrahlen die Sehpyramide erwähnt, fühlt man sich unverzüglich an Euklid erinnert. Und tatsächlich hatte sich in Albertis Bibliothek ein lateinische Übersetzung Euklids befunden (nach [254], S. 69). Generell teilt Alberti den gesamten euklidischen Sehkegel dann in kleinere Sehpyramiden ein und etabliert eine faszinierende Idee (aus [253], S. 69–70):

Wenn es dem so ist, wie ich sagte, so sieht man in der Malerei nichts Anderes als einen gewissen „Querschnitt einer Pyramide. Die Malerei wird also nichts Anderes sein als die auf einer Fläche mittelst Linien und Farben zu Stande gebrachte künstlerische Darstellung eines Querschnittes der Sehpyramide gemäss einer bestimmten Entfernung, einem bestimmten Augenpunkte und einer bestimmten Beleuchtung.“

Alberti beschreibt in der Folge, wie er in einen Bildrahmen auf der Leinwand erstellt und beschreibt diesen mit der Metapher des geöffneten Fensters. Dieses „finestra aperta“ wird bei Alberti zum virtuellen Abbild der realen Umgebung, das Bild zum Fenster.

Alberti liefert in seiner Anleitung keine Bilder und gibt so ein wenig Raum für Interpretation. In der Ausgabe von 1804 [255] wird dazu eine Skizze geliefert (s. Abb. 2.41).

Aufgrund historischer Betrachtung kommt Panofsky zu der Deutung, dass es sich bei Albertis Anweisung wohl um eine „Costruzione legittima“ handelt [256] und liefert dazu ein Skizze (Abb. 2.42).

Aus der groben Beschreibung der Perspektivkonstruktion Albertis wird in della Francescas „Prospectiva pingendi“ [257] eine überaus detaillierte und reich bebilderte

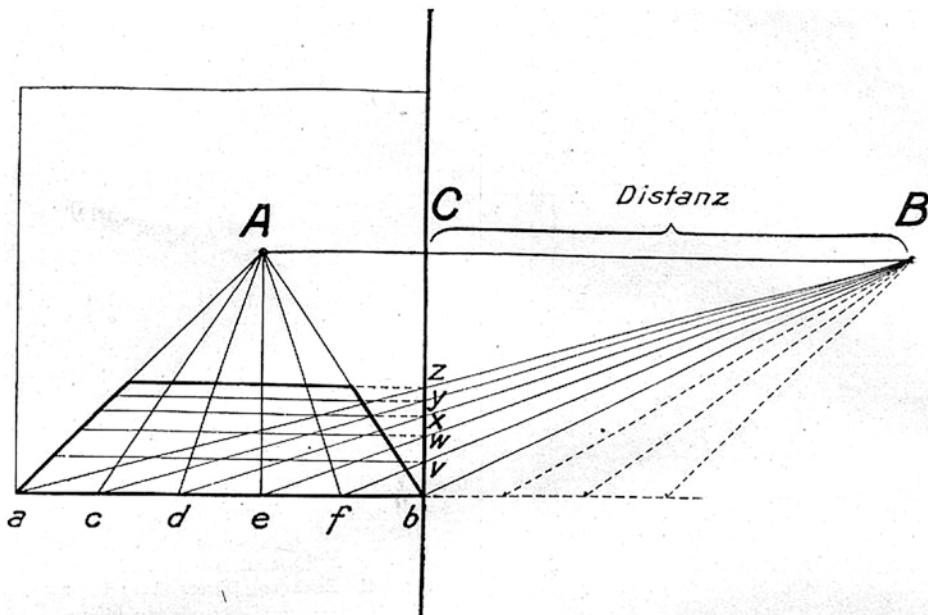


Abb. 2.42 Albertis Costruzione legittima, Erwin Panofsky (1915) aus [256], S. 514, Fig. V

Arbeitsanweisung für den perspektivisch interessierten Maler. Und das kann sich wirklich sehen lassen. Francesca zeigt zunächst an einfachen Körpern sein Verständnis der Perspektive. Stück um Stück entwickelt er immer kompliziertere Gebilde, um schließlich perspektivische Projektionen auch für den menschlichen Körper darstellen zu können. Aus einem präzise konstruierten menschlichen Kopf in erweiterter Dreitafelprojektion (mit zusätzlicher Betrachtung von unten) entsteht per aufgeteilter horizontaler und vertikaler Projektion eine perspektivische Ansicht von einer anderen (beliebigen) Betrachtungsposition (s. Abb. 2.43). Das ist bemerkenswert. Schon vor mehr als 500 Jahren waren demnach 3D-Rekonstruktionen aus einer geringen Anzahl von 2D-Projektionen möglich.

Della Francesca unterteilt seine geometrische Perspektive in fünf Abteilungen (nach [259] XI):

1. das Sehen (das Auge)
2. die Form des gesehenen Gegenstandes
3. der Abstand vom Auge zum gesehenen Gegenstand
4. die Linien, die vom Rand des Gegenstandes zum Auge gehen
5. die Grenzebene zwischen Auge und Objekt, auf der die Gegenstände abgebildet werden

Diese Informationen sind ausreichend, um eine Perspektive zu konstruieren, wie della Francesca auch in seinen eigenen Gemälden eindrucksvoll zeigen konnte (z. B. in

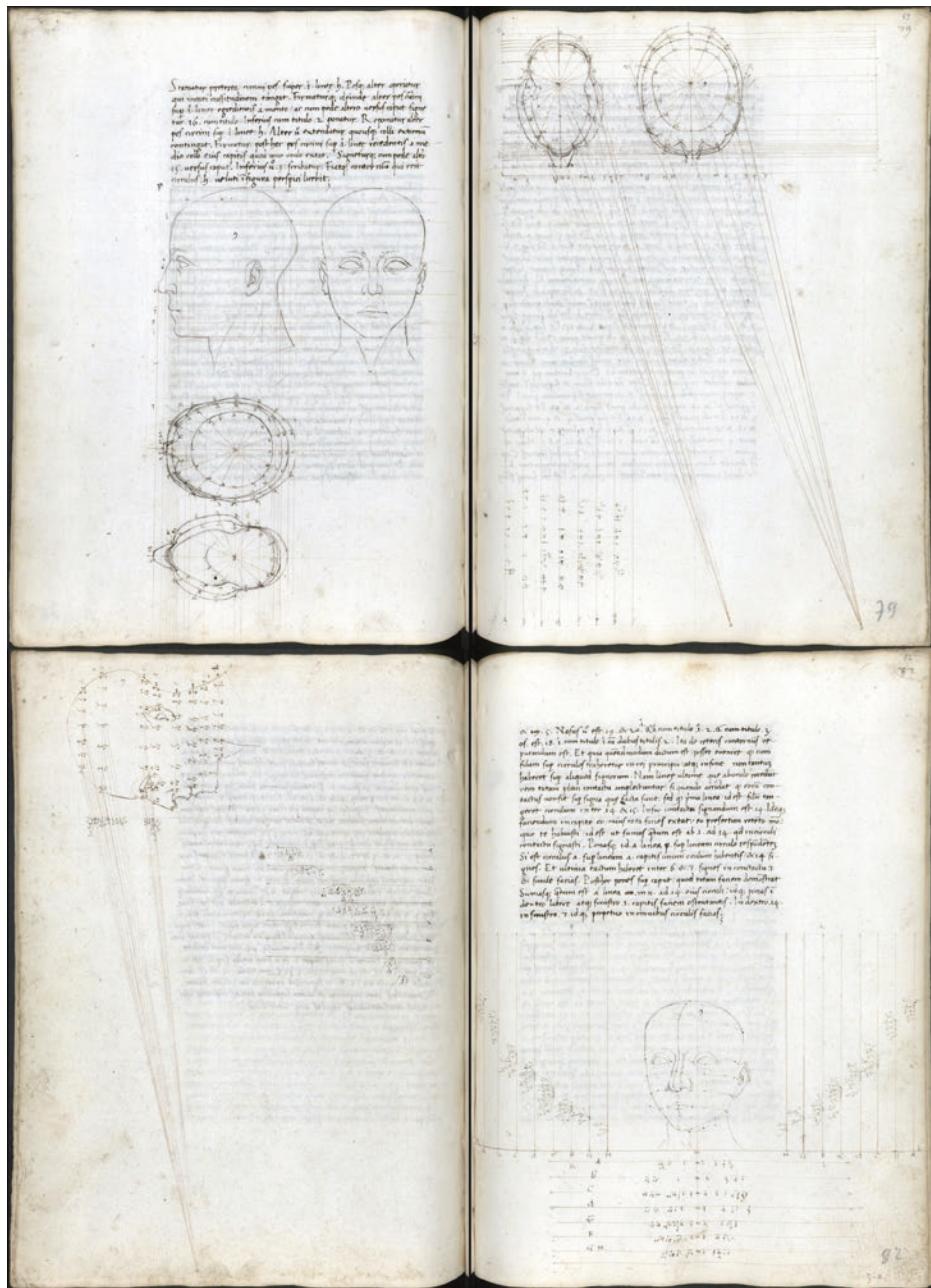


Abb. 2.43 3D-Rekonstruktion aus Perspektiven, Piero della Francesca (1460), aus [258] in Manuskrift 616, Bibliothèque de Bordeaux, Fol. 74v, 79r, 80v, 82r

Abb. 2.44 Pala Montefeltro (La Vergine con il Bambino e santi), Piero della Francesca, (um 1470), Pinacoteca di Brera, Mailand, Fotografie aus „The Yorck Project“



Abb. 2.44). Bemerkenswert sind neben der perspektivisch genauen Darstellung der Architektur auch die präzise beobachteten Reflexionen auf dem poliertem Helm des kneienden Herzogs von Urbino.

Ein Schüler della Francescas soll Pacioli gewesen sein. Pacioli wurde später zu einem bekannten Mathematiker und hatte mit seiner 1494 erschienenen Schrift „Summa de arithmeticā geometriā“ [260] eines der ersten gedruckten Mathematikbücher überhaupt herausgegeben. Mit dem im Buch enthaltenen Traktat über die Buchhaltung¹⁴⁰ kann Pacioli auch als Erfinder der doppelten Buchführung gelten. Seine Kenntnisse in Mathematik und Geometrie nutzte Pacioli auch auf künstlerische Weise. In dem 1509 herausgegebenen Buch „Göttliche Proportionen“ („Divina proportione“) [262] schrieb er über die geometrischen Verhältnisse von Linien, Flächen und Körpern und ließ diese von Leonardo da Vinci zeichnen (aus [263], S. 282):

„...jene Figur wird die des besagten Körpers sein, der mit aller Vollkommenheit der Perspektive auf die Ebene projiziert [wird], wie es unser Leonardo Vinci versteht.“

¹⁴⁰Tractatus XI. Particularis de computis et scripturis, auch in „Abhandlung über die Buchhaltung“ [261].

Hintergrundinformation

Pacioli wird nicht nur die Kenntnis von della Francescas Mathematik nachgesagt, sondern seit Vasaris Plagiats-Vorwurf in della Francescas Biografie auch eine unglückliche Neigung zur Ungenauigkeit im Zitieren. Der Vorwurf zielte auf die Kopie eines Francesco-Traktates „über die fünf regelmäßigen Körper“ durch Pacioli ab. Fünf Jahrhunderte konnte die Beschuldigung nicht geklärt werden, da die Urschrift Francescas nicht auffindbar war. Jordan, der die Handschrift „De quinque corporibus regularibus et de corporibus irregularibus“ [264] 1880 im Codex Urbinus Latinus unter dem Autorennamen „Pictor¹⁴¹“ katalogisiert fand, wollte die Schrift ursprünglich neu herausbringen, nahm aber davon Abstand (nach [265], S. 115):

„Meine Absicht, sie herauszugeben, wurde jedoch dadurch hinfällig, dass ich in Luca Paciolis Traktat über die fünf regelmäßigen Körper¹⁴² die wörtliche italienische Übersetzung der lateinisch abgefassten Schrift des Piero erkannte.“

Die Aufgabe der perspektivischen Darstellung der von Pacioli mathematisch beschriebenen Körper löst da Vinci meisterhaft. Pacioli hatte, wie schon della Francesca zuvor, die Erklärung dazu gegeben „warum es nicht mehr als fünf regelmäßige Körper geben kann“ (aus [263], S. 213 ff.). Es handelt sich dabei um die platonischen Körper, die nach dem Philosophen Platon Körper größtmöglicher Symmetrie sind. Die Symmetrie der Vielfächner, der Polyeder, wird durch die Form gleichartiger Flächen definiert, die zusammen die Oberfläche dieser regulären Körper bilden. Es kann tatsächlich nur fünf platonische Körper geben. Die Namen der Körper basieren immer auf der Zahl der Flächen: Tetraeder (4flächner, Pyramide aus Dreiecken), Hexaeder (6flächner, Würfel aus Quadraten), Oktaeder (8flächner, Doppelpyramide aus Dreiecken), Dodekaeder (12flächner aus Fünfecken) und Ikosaeder (20flächner aus Dreiecken).

Zusätzlich zu den Platonischen Körpern zeichnet da Vinci auch einige Archimedische Körper. Archimedische Körper sind ebenfalls aus Vielecken gebildet, die allerdings verschieden sein können, jedoch an den Ecken auf gleiche Weise aufeinandertreffen müssen da Vincis abgestumpftes Ikosaeder entspricht dem heutigen Fußball, der aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken besteht. Um da Vincis Verständnis der Perspektive zu illustrieren, ist hier zusätzlich noch ein durchbrochenes „Fußball“-Ikosaeder dargestellt (Abb. 2.45).

Tatsächlich sind die da Vincis Zeichnungen in Paciolis Schrift ein äußerst seltenes Zeugnis einer von Leonardo selbst autorisierten Veröffentlichung. Neben seinem bedeutenden Bildwerk sind seine vielfältigen wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Arbeiten nur durch seine zahlreichen Skizzen und Notizbücher überliefert. Es ist seinem Schüler und Erben Melzi zu verdanken, dass einige der Gedanken da Vincis zur Malerei in der Schrift „Trattato della pittura“ [266] zusammengefasst wurden. Neben grundsätzlichen Anweisungen zur Zeichnung, Proportion, Anatomie,

¹⁴¹Nach dem lat. Namen Pietro della Francescas: Petrus Pictor Burgensis.

¹⁴²Mit Incipit „Libellus in tres partiales tractatus divisus quinque corporum regularium“ als Beilage der „Divina proportione“ von 1509 (ab Tractatus Primus in [262]).

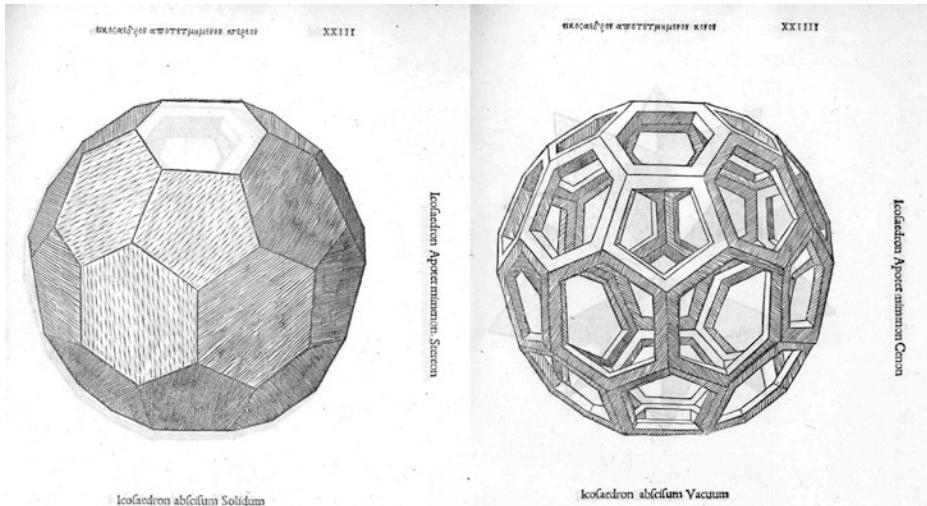


Abb. 2.45 Da Vincis Ikosaeder, Leonardo da Vinci (1509) aus [262] aus XXIII und XXIIII

Ponderation¹⁴³, Licht, Schatten und Reflexion enthält die Sammlung auch Belehrungen zur Gestaltung der Perspektive inklusive der von da Vinci verwendeten Luftperspektive¹⁴⁴. Ein geeignetes Beispiel einer Belehrung da Vincis scheint die Anleitung zur Zeichnung einer Figur aus der Froschperspektive zu sein (Abb. 2.46).

Da Vincis Kenntnis der linearen Perspektive (*prospettiva lineare*¹⁴⁵) ist somit durch Melzis „Trattato della pittura“ verbürgt, das im „Codex Urbinus Latinus 1270“ [268] als Teil der Notizbücher da Vincis [269] die Zeiten überdauert hat. Ebenso kann die Kenntnis der zehn Bücher des Vitruv durch die Zeichnung des Vitruvianischen Mannes nach Vitruvs Anweisung¹⁴⁶ belegt werden. Da Vinci gelang die Darstellung der Proportionen eines menschlichen Körpers anhand des Textes von Vitruv so gut, dass die Zeichnung

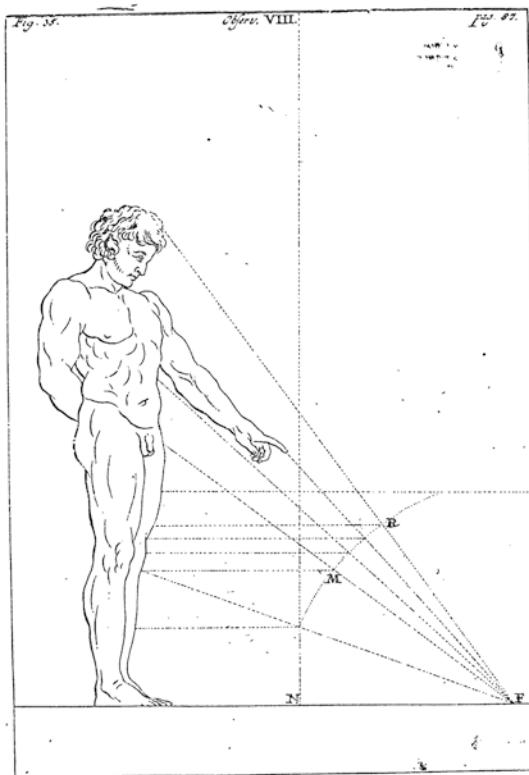
¹⁴³Komposition von Gemälden hinsichtlich optimaler Darstellung der Gewichtsverteilung (realistische Darstellung von Haltung und Bewegung).

¹⁴⁴Da Vinci verwendet auch den Begriff „Sfumato“ [266], S. 105.

¹⁴⁵Ludwig benutzt allerdings die Bezeichnung „prospettiva lineale“ [268], S. 218.

¹⁴⁶„Der Mittelpunkt des Körpers ferner ist von Natur der Nabel. Denn wenn ein Mensch mit ausgespannten und Füßen auf den Rücken gelegt wird und man den Zirkelmittelpunkt in seinen Nabel einsetzt, so werden, wenn man die Kreislinie beschreibt, von den beiden Händen und Füßen Finger und Zehen von der Linie berührt. Eben so, wie die Figur eines Kreises an dem Körper dargestellt wird, so wird auch die eines Quadrates an ihm gefunden. Denn wenn man vom unteren Ende der Füße bis zur Scheitelhöhe misst und dieses Maß auf die ausgespannten Hände überträgt, so wird man dieselbe Breite wie Höhe finden, wie dies bei Flächen ist, die nach dem Winkelmaß quadratisch gemacht sind.“ (aus [201], S. 131–133)

Abb. 2.46 Auf eine 12 Ellen hohe Mauer eine Figur zu zeichnen, die also erscheinet, als ob sie 24 Ellen hoch stünde. Johann Georg Böhm Sen. (1747) aus [267], S. 87
Fig. 35



noch heute ein beliebtes Motiv ist und genauso verwendet wird, wie da Vinci es gezeichnet hatte – zum Beispiel auf der italienischen Euromünze. Da Vinci hatte im Codex Atlantico auch den „Prospettografo“ (Perspektograph) (Abb. 2.47) skizziert, der zur perspektivischen Zeichnung eines komplizierteren Objektes dient.

Obgleich das Bild sicherlich eine seiner schwächeren Arbeiten ist, zeigt es doch deutlich die beabsichtigte Funktion. Der Zeichner sieht durch einen realen Augpunkt durch eine transparente Zeichenfläche (vermutlich ein gröberes Gewebe) auf das Objekt und kann es so auf das Raster des Gewebes übertragen.

In seiner Zeit war da Vinci aber eher als Künstler bekannt und konnte denen, die ihn nicht persönlich kannten, kaum als Theoretiker der Perspektive dienen. Zur gleichen Zeit wie da Vinci in Italien lebte der Maler Dürer in Deutschland. Dürer reiste nach Venedig und studierte dort die italienischen Meister, die ihn stark beeinflussten. Dürers malerischer Realismus war mindestens so außergewöhnlich, wie seine mathematischen Fertigkeiten. Dürer kannte die lateinische Ausgabe der „Elemente des Euklid“ und verfasste mit der „Underweysung der Messung mit dem Zirckel und richtscheyt“ [270] das erste deutsche Mathematikbuch.

Abb. 2.47 Prospettografo,
Leonardo da Vinci (ca. 1480)
aus dem Codex Atlanticus Fol.
5 r, Biblioteca Ambrosiana
Mailand



Ob Dürer da Vincis „Perspektograph“ gesehen oder davon gehört hatte, ist nicht bekannt. Gewiss kann aber mit diesem Namen bis heute ein einfacheres Gerät zur Aufzeichnung der Perspektive bezeichnet werden, was als „perspectograph“ noch treffsicherer in englischer Sprache funktioniert [271]. Dergleichen Hilfsmittel werden seit dem Mittelalter zur perspektivisch korrekten Kopie einer Szene genutzt. Auch Albrecht Dürer hat im Holzschnitt „Der Zeichner des sitzenden Mannes“ ein solches Gerät skizziert (Abb. 2.48).

Dabei wird eine Szene durch ein Raster oder transparentes Medium von einem festen Punkt aus betrachtet. In der Wirkung handelt es sich hier um eine Zentralprojektion aus dem Augpunkt des Meisters auf die Zeichenfläche.

Heute verbirgt sich hinter dem deutschen Wort „Perspektograph“ ein etwas anderes Gerät, wenngleich auch in ähnlicher Funktion. Der Berliner Professor Hauck hatte 1883 eine Theorie vorgestellt, mit der sich aus zwei Projektionen eine beliebige dritte Projektion ermitteln lässt und dazu einen mechanischen Apparat vorgeschlagen. Das Gerät wurde zunächst als „Trikograph“ bezeichnet [272], [273] und später in veränderter Version als Perspectograph (auch Perspektograph) durch den Frankfurter Architekten Ritter in den Handel gebracht [274, 275] (Abb. 2.49).



Abb. 2.48 Der Zeichner des sitzenden Mannes, Albrecht Dürer (1525) [270]

Es ist fraglos, dass nach da Vinci und Dürer auch außerhalb Italiens und Deutschlands eine Zeit des natürlichen Realismus und der realistischen Perspektive einsetzte. Ohne auf jeden Künstler eingehen zu wollen, seien hier stellvertretend nur einige der großen Barockmaler genannt. Allen voran der Licht-, Farben- und Sinnesmaler Rubens, Vermeer mit seinen lebendigen Genreszenen und schließlich der legendäre Porträt- und Landschaftsmaler Rembrandt. Diese und viele andere Künstler haben eindrucksvoll demonstriert, dass sich realistische perspektivische Abbildungen von realen und virtuellen Objekten anfertigen lassen.

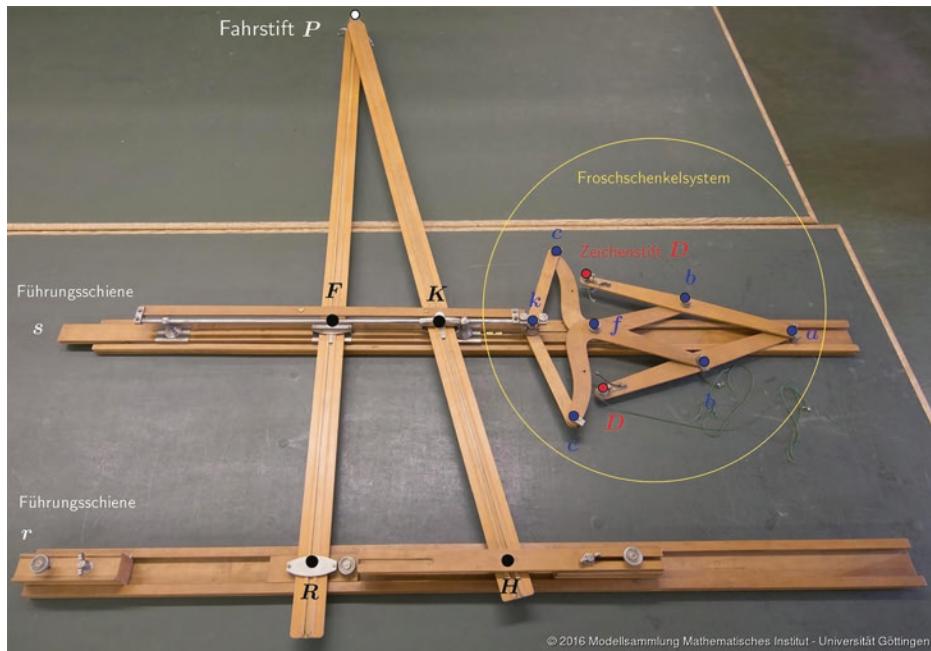


Abb. 2.49 Perspektograph von Ritter, Modell 834, Göttinger Sammlung mathematischer Modelle und Instrumente, mit freundlicher Genehmigung von Prof. Bartholdi

2.6 Multiperspektiven

Ein Bild aus verschiedenen Blickwinkeln

Auch ein zweidimensionales Bild kann mehrere Perspektiven enthalten. Manche Bilder enthalten Elemente, die sich ihrem Betrachter erst bei Bobachtung aus der korrekten Perspektive offenbaren. Das sind häufig Bilder mit stark umgeformter Gestalt, die erst unter extremen Winkel oder einem speziell gewölbten Spiegel zu erkennen sind. Ein frühes Beispiel solcher Anamorphosen¹⁴⁷ ist Holbeins Bild „Die Gesandten“. Auf dem Bild (Abb. 2.50 links) ist ein im Vordergrund ein Objekt abgebildet, welches im Bild wie ein unbekannter Fremdkörper wirkt und eigentlich nur die Bildkomposition zu stören scheint. Erst bei extremer Schrägsicht von rechts oben zeigt sich, was Holbein beabsichtigt hat. Tatsächlich hatte der Maler einen Totenschädel abgebildet, der nur in ungewöhnlicher Perspektive als solcher wahrnehmbar wird (Abb. 2.50 Mitte und rechts, vergrößert).

¹⁴⁷Von griech. Anamorphosis=Umformung.

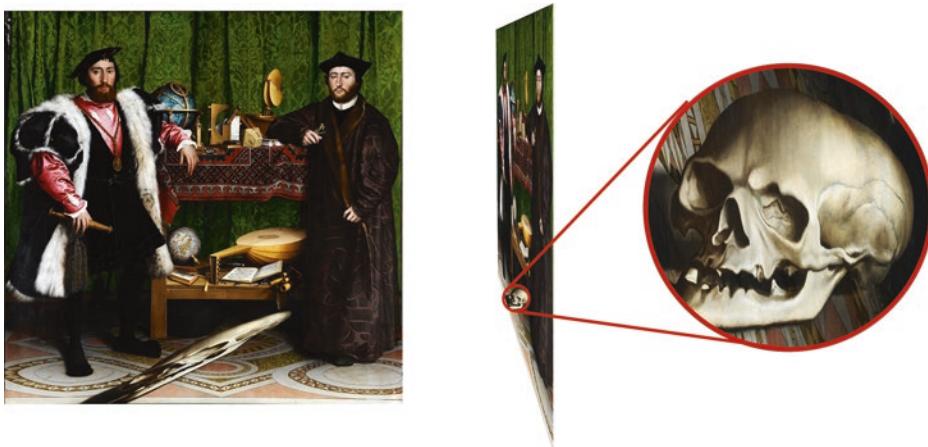


Abb. 2.50 Die Gesandten, Hans Holbein der Jüngere (1533), The National Gallery, London, Google Art Project, Entzerrung Grasnick (2019)

Die Darstellung solcher Objekte diente dabei nicht grundsätzlich der reinen Unterhaltung des Betrachters, sondern ganz besonders auch der Unterstreichung der Fähigkeiten des Künstlers. Holbein hatte mit „Den Gesandten“ eine starke Illustration seines Verständnisses der perspektivistischen Verkürzung geliefert, eine Beschreibung des Weges zum verzerrten Resultat jedoch nicht.

Dabei muss die zweite Perspektive nicht notwendigerweise Teil des gleichen Bildes sein. Der italienische Maler Buti hatte bereits im 16. Jahrhundert ein Bild angefertigt, das Karl III., den Herzog von Lothringen und seine Tochter Christine darstellt. Der Untergrund des Gemäldes ist aber in diesem Fall nicht flach, sondern besteht aus prismatischen Leisten. Auf die eine Seite der Leisten ist der Herzog gemalt, auf die andere Seite Christine. Von unten betrachtet erscheint der Herzog, von oben gesehen seine Tochter (in Abb. 2.51 im Spiegel oberhalb des Bildes).

Der Architekt da Vignola war nicht nur ein Anwender der Perspektive, sondern auch ein Praktiker. In seinen „Regeln der praktischen Perspektive“ [276] finden sich viele handhabbare Beschreibungen und kleinere Hilfsmittel zum Erstellen brauchbarer Perspektivbilder. Darin beschreibt Vignola nun auch die Herstellung solcher Trickbilder (s. Abb. 2.52).

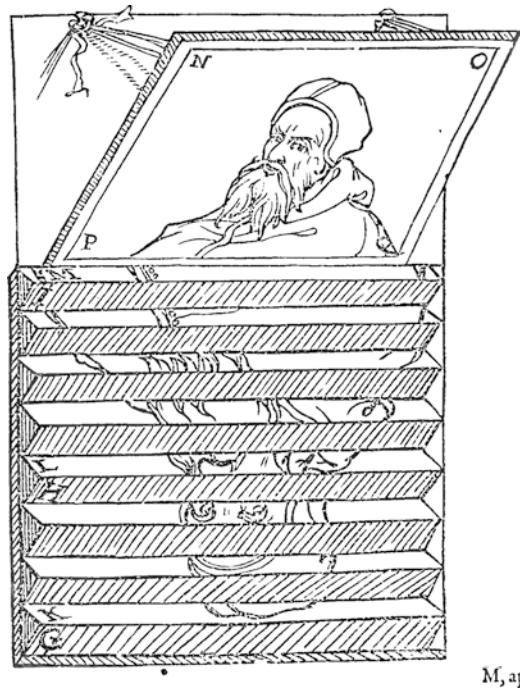
Derartige Bilder wurden in der Folge nicht nur in Italien angefertigt, sondern waren auch in Shakespeares England bekannt [277].

Die Renaissance der Wissenschaft und Kunst war neben den Einflüssen der Antike und den Erkenntnissen der realistischen Perspektivmalerei auch stark von religiöser Darstellung und biblischen Motiven geprägt. Das lag natürlich zu allererst am exklusiven Zugang der Geistlichen zu dem erhaltenen Wissen in den Bibliotheken und Klöstern, aber natürlich auch am Reichtum der Kirche, die häufig auch Auftraggeber für

Abb. 2.51 Gioco ottico, Ludovico Buti (1593), Museo Galileo Firenze – Istituto e Museo di Storia della Scienza, Sala I, Inv. 3197, mit freundlicher Genehmigung des Museo Galileo Florenz



Abb. 2.52 Facettenbild, Giacomo da Vignola (1583) aus [276], S. 95



die Künstler war. Zudem waren die Geistlichen häufig auch Gelehrte, lasen und sprachen Latein und Griechisch und waren mitunter weitgereist.

Es ist also nicht verwunderlich, dass sich auch allerlei Priester und Mönche mit der Mathematik der Darstellung beschäftigt hatten.

Der Jesuit Bettini sammelte im „Bienenstock der gesamten Philosophie und Mathematik“ (*Apiaria Universae Philosophiae Mathematicae*) zahlreiche mathematische Kuriositäten und beschrieb unter anderem auch die praktische Bestimmung von Entfernung, Winkeln und Höhen mit dem Jakobsstab. Ein Großteil des Buches ist der Geometrie gewidmet. Spannend wird es aber eigentlich erst ab dem Moment, von dem an Bettini die wissenschaftliche Projektion erläutert. Auch Bettini beschreibt einen Perspektographen, den er allerdings Skenographisches Konstruktionselement nennt, was die Sache recht gut beschreibt. Mit diesem Gerät kann eine Ansicht oder ein Objekt in eine andere Perspektive überführt werden (s. Abb. 2.53).

Dabei wird der dichter am Bild stehende Stab in der Höhe so angepasst, dass sein oberes Ende eine Linie mit dem Augpunkt und dem Beobachtungspunkt bildet. Der horizontale Stab bestimmt dann die Höhe im Bild. Bettini entwirft noch weitere

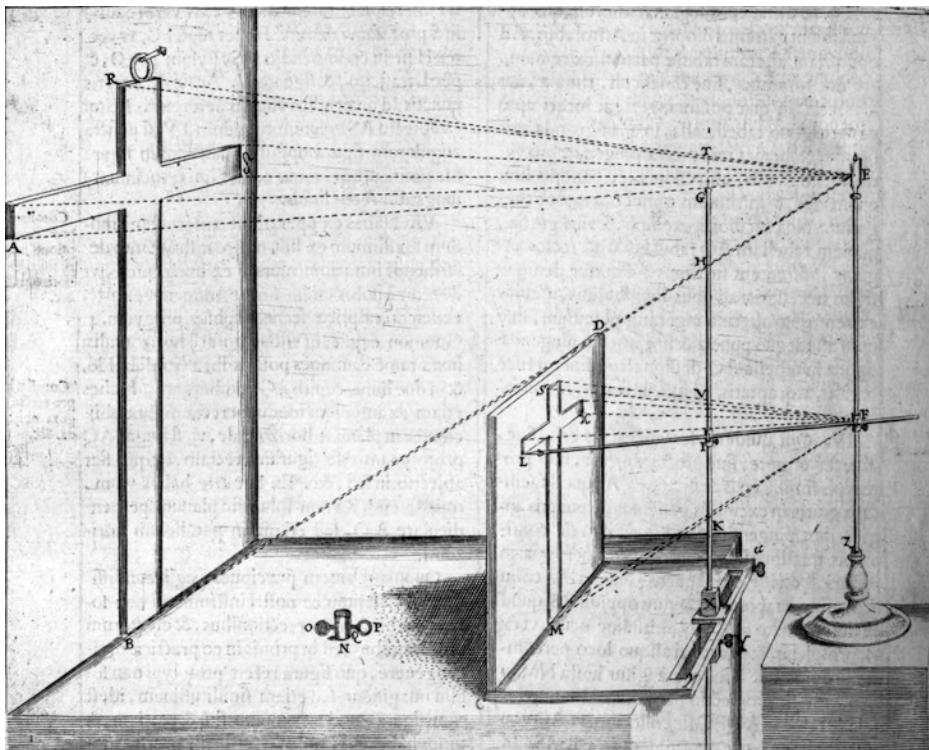
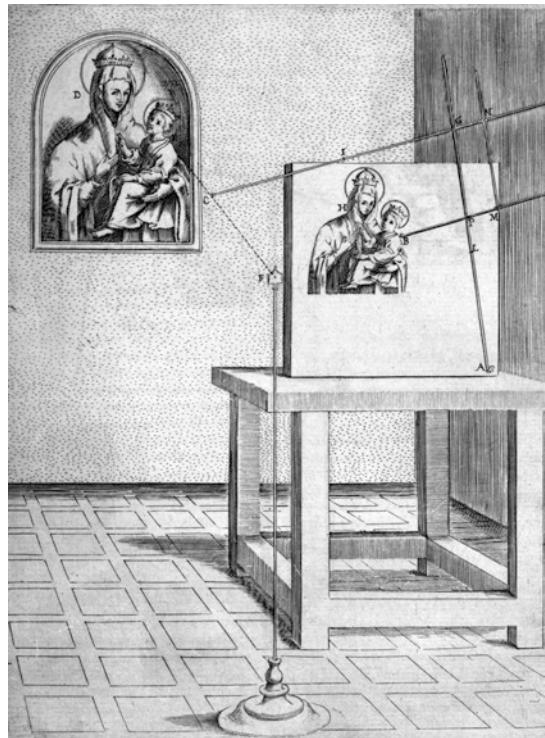


Abb. 2.53 Constructio instrumenti scenographici, Mario Bettini (1642) aus [278] Apiar V S. 36

Abb. 2.54 Instrumenti
scenographici parallelo plano,
Mario Bettini (1642) aus [278]
Apiae V S. 52



Hilfsmittel zur Projektion, mit denen er ebenfalls das gewünschte Ergebnis, nämlich die maßstäbliche Reproduktion eines Originals, erreicht (s. Abb. 2.54).

Das Wissen um die Projektion erleichterte Bettini die geometrische Erklärung der Anamorphose. Und schließlich findet sich bei ihm auch eine Anleitung zur Erzeugung einer Anamorphose Holbeinscher Art. Was Bettini hier macht, ist zunächst die Aufteilung des unverzerrten Originalbildes (so wie es gesehen werden soll) in ein Raster. Jeder Rasterpunkt wird vom Punkt E aus auf die Fläche projiziert, auf der das Bild dann gemalt wird (Abb. 2.55). Wer aufmerksam hinschaut, sieht hier schon die Grundzüge der Computergrafik dargestellt.

Die Kenntnis die Projektion auf beinahe beliebige Flächen (und sogar gewölbte Spiegel) und die dafür notwendige Vorverzerrung der Bilder für eine bestimmte Perspektive war nicht nur bei Bettini vorhanden. Der Jesuit Schott hatte mit dem Kapitel „De magia anamorphotica“ seiner „Magia universalis naturae et artis“ ebenfalls eine Anleitung zur Herstellung von Anamorphosen [279] beigefügt. Dies wurde schon häufig besprochen¹⁴⁸ und soll daher hier nicht erneut Gegenstand der Untersuchung sein.

¹⁴⁸Z. B. in [280], S. 102.

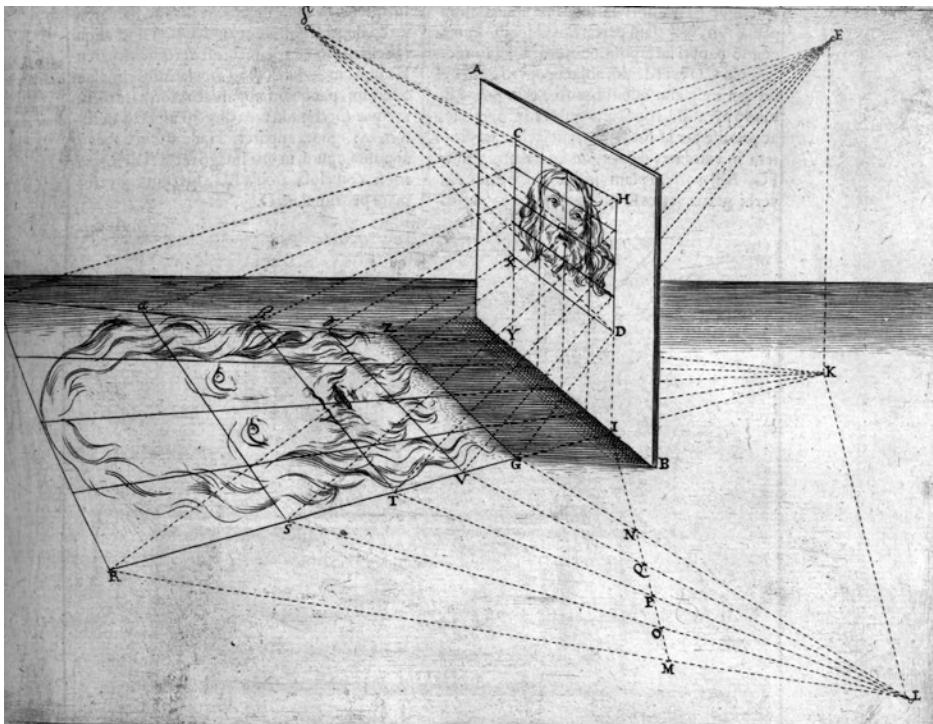


Abb. 2.55 De deformationibus è superficiebus planis, Mario Bettini (1642) aus [278] Apia V S. 25

Allerdings wird sowohl von Bettini in der „*Apiaria universae*“, als auch von Schott in der „*Magia anamorphotica*“, eine Methode beschrieben, welche zu einem Bild mit zwei gleichwertigen Perspektiven führt. Das später als Riefelbild bezeichnete Verfahren bedingt grundsätzlich die Prismen (Riefeln) für die Bildmontage (s. Abb. 2.56 links), sowie die beiden Bilder, die auf die Riefeln aufgebracht werden (in Frontalsicht mit beiden Bildern in Abb. 2.56 rechts). Dargestellt ist hier, aufgrund der höheren zeichnerischen Qualität, der Entwurf Bettinis.

Die Linien, die in Abb. 2.56 links von einem Punkt L ausgehen, zeigen hier auch gut die Abschattung der Bildinhalte durch die Prismen bei Betrachtung aus dem Punkt L. Heute würde man das als Vignettierung bezeichnen.

Solche Bilder wurden natürlich nicht nur von gelehrten Jesuiten beschrieben, sondern tatsächlich auch von Künstlern gemalt. Das Riefelbild des Pastor Pauli und seiner Frau aus Brekum [281]¹⁴⁹ wurde von einem unbekannten Künstler angefertigt. Es existieren daneben aber auch andere Werke, deren Maler durchaus bekannt ist. Der Maler de

¹⁴⁹s. in [280], S. 100.

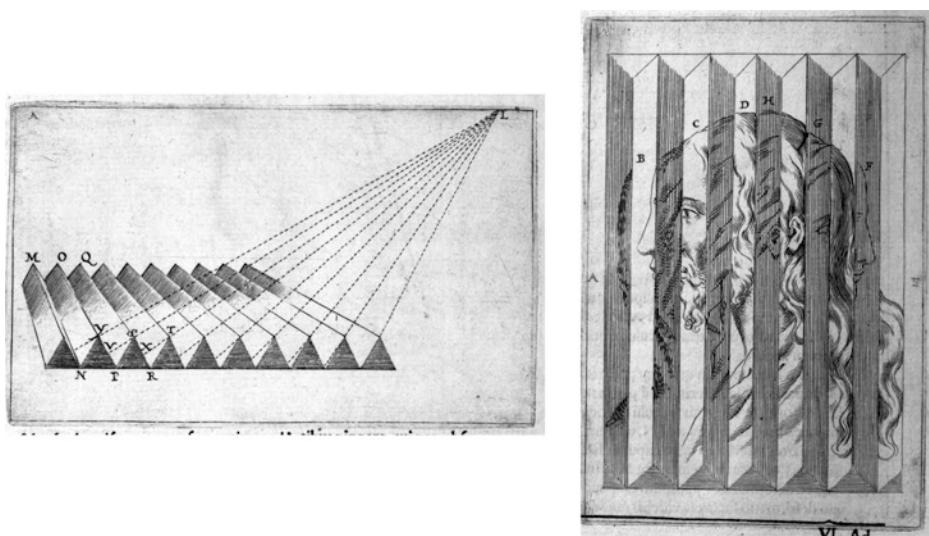


Abb. 2.56 Bettinis Riefelbild, Mario Bettini (1642) aus [278] Apiar V S. 29

Bois-Clair hatte ein Doppelporträt des Königspaares Christian V. und Charlotta Amalia von Dänemark und Norwegen auf den von Bettini und Schott skizzierten Dreikantfacetten gemalt. Dieses Bild befindet sich heute in den Sammlungen der Gemäldegalerie Alte Meister der Museumslandschaft Hessen Kassel (Abb. 2.57).

In Abb. 2.57 kann man die unterschiedlichen Perspektiven recht gut erkennen. Bewegt man sich vor dem Bild von links nach rechts, so erscheint zuerst König Christian, dann entsteht ein Mischbild des Königspaares und schließlich, beim Blick von der rechten Seite, gibt sich die Königin zu erkennen.

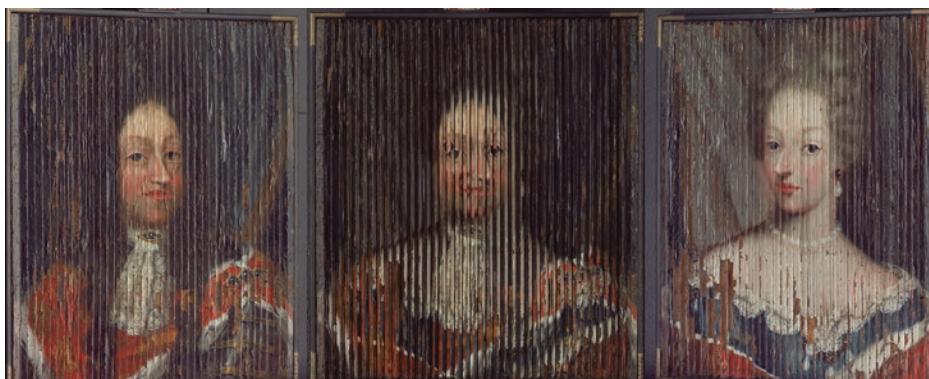


Abb. 2.57 König Christian V. und Königin Charlotta Amalia von Dänemark und Norwegen; zwei Porträts auf Dreikantfacetten, Gaspar Antoine de Bois-Clair (1692), Gemäldegalerie Alte Meister, mit freundlicher Genehmigung der Museumslandschaft Hessen Kassel, Schloss Wilhelmshöhe



Abb. 2.58 Souvenirikone; Lamellenbild, Ident Nr. N (32 S) 1/1994,8301, Staatliche Museen zu Berlin, Fotografie Ute Franz-Scarciglia, mit freundlicher Genehmigung der bpk Bildagentur, Museum Europäischer Kulturen SMB

Ein weiteres Doppel-Portrait des dänischen Königs Frederik IV., dem Sohn von Christian V. und Charlotta Amalia, und Frederiks Gemahlin Louise zu Mecklenburg-Güstrow wurde von Bois-Clair angefertigt, welches vor einigen Jahren von der New Yorker Galerie „Robert Simon Fine Art“ angeboten wurde und zwischenzeitlich vermutlich in einer privaten Sammlung verschwunden ist.

Das zeigt jedoch zumindest, dass solche Bilder ab und an angefertigt wurden, insbesondere wenn damit die Darstellung eines Paares verknüpft war, was durch die Bezeichnung „Doppelporträt“ gut beschrieben wird.

Die Betrachtung eines Riefelbildes aus der zentralen Position direkt vor dem Bild führt zwingend zu einer Verschlechterung des Bildeindrucks. Es ist daher naheliegend, dieser Betrachtungsposition ein drittes Bild zuzuordnen. Drei Perspektiven gleichzeitig können in einem sogenannte Lamellen- oder Harfenbild dargestellt werden. Die mitunter verwendeten Bezeichnungen „Trisceneorama“ oder „Three-Way-Picture“ stellen glatt beschreibende Bezeichnungen des Sachverhaltes dar. Jedes Bild ist aus drei Einzelbildern (Szenen oder Perspektiven) zusammengesetzt. Derlei Bilder eigneten daher sich ganz vorzüglich zur religiösen Darstellung der Trinität, der Dreieinigkeit oder Dreifaltigkeit aus Vater, Sohn und Heiliger Geist [282] und offenbarten dem sich vor dem Bild bewegenden Betrachter die Wesenseinheit der drei göttlichen Hypostasen¹⁵⁰. Ein religiöses Lamellenbild mit Madonna ist in Abb. 2.58 dargestellt.

¹⁵⁰Hypostase – Personifizierung göttlicher Eigenschaften oder religiöser Vorstellungen zu einem eigenständigen göttlichen Wesen, z. B. in der christlichen Theologie die drei Personen der Trinität.

Der mechanische Aufbau ist gegenüber einem Riegelbild etwas schwieriger herzustellen. Es müssen möglichst schmale Lamellen mit kleiner Grundfläche senkrecht auf einem planen Untergrund befestigt und zusätzlich auf die Seitenflächen die seitlichen Perspektivbilder montiert werden.

Die Perspektivansichten des Wechselbildes entsprechen in der Regel nicht den wirklichen Zentralprojektionen einer Szene aus verschiedenen Positionen. Der Begriff Perspektive ist eben nicht immer rein geometrischer Natur, sondern beschreibt mitunter auch die Betrachtung einer bestimmten Sache. Zum Beispiel ist die vorher erwähnte wechselbildliche Darstellung der göttlichen Trinität im Wesentlichen eine philosophische Perspektive.

Es kommt ganz auf den Standpunkt an. Die deutsche Bürokratie nutzt Begriffe wie „Bedarfsgemeinschaft“ oder „steuerliche Einheit“ zur Beschreibung von Lebenspartnerschaften oder Interessenseinheiten. Diese Einheiten bestehen aus einzelnen Individuen (oder juristischen Personen) und können einzeln oder gemeinsam betrachtet werden, je nach gewählter Perspektive.

Literatur

1. Darwin C. Über die Entstehung der Arten im Thier- und Pflanzenreich durch natürliche Züchtung. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung; 1863.
2. Sedgwick A. On the classification and nomenclature of the Lower Palaeozoic rocks of England and Wales. Q J Geol Soc. 1852;8:136–68.
3. Sedgwick A, Murchison RI. On the Silurian and Cambrian systems, exhibiting the order in which the older sedimentary strata succeed each other in England and Wales. Report of the Fifth Meeting of the British Association for the Advancement of Science; Held in Dublin in 1835; Notices of Communications; 1836. S. 59–61.
4. Sprigg RC. Early Cambrian (?) jellyfishes from the flinders ranges, South Australia. Trans R Soc S Aust. 1947;71:212–24.
5. Xiao S, Shen B, Zhou C, Xie G, Yuan X. A uniquely preserved Ediacaran fossil with direct evidence for a quilted bodyplan. Proc Natl Acad Sci. 2005;102:10227–32.
6. Gould SJ. Zufall Mensch: das Wunder des Lebens als Spiel der Natur. München: Hanser; 1991.
7. Nash M. Evolution's big bang: when life exploded. Time Mag. 1995;146(23):66–74.
8. Holmes B. Evolution's big bang: how life on Earth took off. New Sci. 2015;(Aug. 3010);38–41.
9. Herloßsohn C. Herausgeber. Damen Conversationslexikon. Adorf: Verlags-Bureau; 1835.
10. Ehrenberg CG. Organisation, Systematik und geographisches Verhältniß der Infusionstierchen. Berlin: Königliche Akademie der Wissenschaften; 1830.
11. Ehrenberg C. Die Infusionstierchen als vollkommene Organismen: ein Blick in das tiefere organische Leben der Natur: nebst einem Atlas von vierundsechzig colorirten Kupfertafeln. Leipzig: Leopold Voss; 1838.
12. Grell KG. Protozoologie. 2. Berlin: Springer; 1968.
13. Iseki M, Matsunaga S, Murakami A, Ohno K, Shiga K, Yoshida K, et al. A blue-light-activated adenylyl cyclase mediates photoavoidance in Euglena gracilis. Nature. 2002;415:1047–51.

14. Garm A, Coates MM, Gad R, Seymour J, Nilsson D-E. The lens eyes of the box jellyfish *Tripedalia cystophora* and *Chiropsalmus* sp. are slow and color-blind. *J Comp. Physiol A.* 2007;193:547–57.
15. Berger EW, Conant FS. Physiology and histology of the Cubomedusae, including Dr. F.S. Conant's notes on the physiology. Baltimore: The Johns Hopkins Press; 1900.
16. Garm A, Oskarsson M, Nilsson D-E. Box jellyfish use terrestrial visual cues for navigation. *Curr Biol.* 2011;21:798–803.
17. Haeckel E. *Berg- und Seefahrten* 1857/1883. Leipzig: R. F. Koehler; 1923.
18. Haeckel E. Das System der Siphonophoren auf phylogenetischer Grundlage entworfen. *Jenaische Z Naturwissenschaft.* 1888;22:1–46.
19. Haeckel E. *Kunstformen der Natur*. Leipzig: Bibliographisches Institut; 1899.
20. Young GA, Hagadorn JW. The fossil record of cnidarian medusae. *Palaeoworld.* 2010;19:212–21.
21. Kutschera U. *Evolutionsbiologie: Ursprung und Stammesentwicklung der Organismen*. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer; 2015.
22. Linné C. *Systema naturae per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis*. Stockholm: Laurentius Salvius; 1766.
23. Linné C. Herrn Carl von Linnés Reisen durch Oeland und Gothland 1741. Halle: Johann Jacob Curt; 1764.
24. Woltersdorff JL. *Systema minerale in quo regni mineralis producta omnia systematice per classes, ordines, genera et species proponuntur. Mineral-System worin alle zum Mineral-Reich gehörige Körper in ordentlichem Zusammenhange nach ihren Classen, Ordnungen, Geschlechtern und Arten vorgetragen werden*. Berlin: Christian Ludewig Kunst; 1748.
25. Walch JEI. *Die Naturgeschichte der Versteinerungen zur Erläuterung der Knorrischen Sammlung von Merkwürdigkeiten der Natur*. Nürnberg: Paul Jonathan Felßecker; 1771.
26. Clarkson E, Levi-Setti R, Horváth G. The eyes of trilobites: the oldest preserved visual system. *Arthropod Struct Dev.* 2006;35:247–59.
27. Portlock JE. Report on the geology of the county of Londonderry, and of parts of Tyrone and Fermanagh: examined and described under the authority of the master general and board of ordnance. Dublin: Andrew Milliken; 1843.
28. Clarke JM. The structure and development of the visual area in the trilobite, *Phacops Rana*, Green. *J Morphol.* 1888;2:253–70.
29. Jell PA. The abathochroal eye of *Pagetia*, a new type of trilobite eye. In: Martinsson A, Herausgeber. *Evolution and morphology of the Trilobita, Trilobitoidea and Merostomata: proceedings of a NATO Advanced Study Institute*. Oslo: Univ.-Forl; 1975.
30. Kepler J. *Strena seu de Nive Sexangula*. In: Dornau C, Herausgeber. *Amphitheatrum Sapientiae Socraticeae Joco-seriae*. Hannover: Schleichius; 1619. S. 751–7.
31. Lagrange J-L. *Recherches d'Arithmetique. Nouveaux Memoires de l'Academie Royale des Sciences et Belles-Lettres*. Berlin: Frederic Voss; 1775. S. 265–312.
32. Gauß CF. Recension der „Untersuchungen über die Eigenschaften der positiven ternären quadratischen Formen von Ludwig August Seeber, Dr. der Philosophie, ordentl. Professor an der Universität in Freiburg. 1831. 248 S. in 4.“ J für die reine und angewandte Mathematik (Crelles J). 1840;1840:312–20.
33. Hsiang W-Y. On the sphere packing problem and the proof of Kepler's conjecture. *Int J Math.* 1993;04:739–831.
34. Hales TC. An overview of the Kepler conjecture. [arXiv:math/9811071](http://arxiv.org/abs/math/9811071) [Internet]. 1998. <http://arxiv.org/abs/math/9811071>. Zugegriffen: 18. Aug. 2018.
35. Hales T. A proof of the Kepler conjecture. *Ann Math.* 2005;162:1065–185.

36. Hales T, Adams M, Bauer G, Dang TD, Harrison J, Hoang LT, et al. A formal proof of the Kepler conjecture. Forum of Mathematics, Pi [Internet]. 2017; 5. https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S2050508617000014/type/journal_article. Zugegriffen: 18. Aug. 2018.
37. v. Frisch K. Der Farbensinn und Formensinn der Biene. In: Spengel JW, Herausgeber. Zoologische Jahrbücher, Abteilung für allgemeine Zoologie und Physiologie der Tiere. Jena: Gustav Fischer; 1915. S. 1–179.
38. Schroeder TBH, Houghtaling J, Wilts BD, Mayer M. It's not a bug, it's a feature: functional materials in insects. Adv Mater. 2018;30:1705322.
39. Stange G, Howard J. An ocellar dorsal light response in a dragonfly. J Exp Biol. 1979;83:351–5.
40. Brückner A, Duparré J, Dannberg P, Bräuer A, Tünnermann A. Artificial neural superposition eye. Opt Express. 2007;15:11922.
41. Medathati NVK, Neumann H, Masson GS, Kornprobst P. Bio-inspired computer vision: towards a synergistic approach of artificial and biological vision. Comput Vis Image Underst. 2016;150:1–30.
42. Cristóbal G, Perrinet L, Keil MS, Herausgeber. Biologically inspired computer vision: fundamentals and applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2016.
43. Exner S. Die Physiologie der facettirten Augen von Krebsen und Insekten. Leipzig: Franz Deuticke; 1891.
44. Mesnik B. Detection, recognition, identification: the new criteria [Internet]. Kintronics. 2017. <https://kintronics.com/detection-recognition-identification-new-criteria/>. Zugegriffen: 19. Aug. 2018.
45. Nilsson D-E, Pelger S. A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve. Proc R Soc B Biol Sci. 1994;256:53–8.
46. Gaarder J. Sofies Welt. Roman über die Geschichte der Philosophie. München: Hanser; 1993.
47. v. Goethe JW. Goethes Werke – Gedichte Dritter Theil. Weimar: Hermann Böhlau; 1890.
48. Schlange-Schöningen H. Die römische Gesellschaft bei Galen: Biographie und Sozialgeschichte. Berlin: De Gruyter; 2003.
49. Galen. Sieben Bücher Anatomie des Galen. Leipzig: J. C. Hinrichssche Buchhandlung; 1906.
50. Hunain Ibn-Ishāq. De oculis. In: Africanus C, Herausgeber. Omnia opera. Lyon: Andrea Turini; 1515.
51. Hunain Ibn-Ishāq. The book of the ten treatises on the eye ascribed to Hunain ibn Ishāq (809–877 A. D.). Kairo: Government Press; 1928.
52. Alhazen, Witelo. Opticae thesaurus. Risner F, Herausgeber. Basel: Episcopios; 1572.
53. Witelo. Witelonis Perspectiva. Biblioteca Apostolica Vaticana: Handschrift; 1201.
54. Witelo. Vitellionis mathematici doctissimi περὶ ὀπτικῆς, id est de natura, ratione et projectione radiorum visus, luminum, colorum atque formarum, quam vulgo Perspectivam vocant, libri X. Tannstetter G, Apian P, Herausgeber. Nürnberg: Johannes Petreius; 1535.
55. Vesalius A. De humani corporis fabrica libri septem. Basel; 1543.
56. Stolberg M. Eine anatomische Inszenierung. Felix Platter (1536–1614) und das Skelett der Frau. In: Schwarze L, Lazardzig J, Herausgeber. Spuren der Avantgarde: Theatrum anatomicum. Berlin: De Gruyter; 2011.
57. Platter F. De corporis humani structura et usu Felicis Plateri libri III: tabulis methodicè explicati, iconibus accuratè illustrati. Basel: Froben; 1583.
58. Koelbing HM. Felix Platter (1536–1614) als Augenarzt. 1990. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=ges-001:1990:47::446>. Zugegriffen: 26. Aug. 2018.
59. Platter F. Praxeos Seu de cognoscendis, praedicendis, praecavendis, curandisq[ue] affectibus homini incommodantibus Tractatus. Basel: Conrad Waldkirch; 1609.
60. Scheiner C. Oculus hoc est fundamentum opticum. Innsbruck: Daniel Agricola; 1619.

61. Scheiner C. Rosa Ursina sive Sol. Bracciani [Bracciano]: pud Andream Phaeum Typographum Ducalem; 1630.
62. Huygens C. Opuscula postuma, quae continent dioptricam. Leiden: Cornelis Boutesteyn; 1703.
63. Muth HL. Anatomia Oculi Humani, Una Cum Structura Artificiali. Oder: Zergliederung Des Menschlichen Auges, Wie auch Eine genaue Darstellung aller desselbigen Theile woselbstens alles accurat vorgebildet, und durch Kunst verfertiget, bestehend aus Horn, Helffenbein, Crystall und Glas. Kassel: Henr. Harmes; 1730.
64. Listing JB. Beitrag zur physiologischen Optik. Göttinger Studien. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht; 1845. S. 52–110.
65. v. Helmholtz H. Handbuch der physiologischen Optik. Leipzig: Leopold Voss; 1867.
66. Schmidt RF, Lang F, Heckmann M, Herausgeber. Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie: mit Online-Repetitorium. Sonderausgabe der 31. Aufl. Berlin: Springer; 2017.
67. v. Helmholtz H. Handbuch der physiologischen Optik. Gullstrand A, v. Kries J, Nagel W, Herausgeber. Hamburg: Leopold Voss; 1909.
68. Lachenmayr B, Friedburg D, Buser A. Auge – Brille – Refraktion: Schober-Kurs: verstehen – lernen – anwenden. 5., vollständig überarbeitete Aufl. Stuttgart: Georg Thieme; 2016.
69. Haigis W. Zur Herkunft der Hornhautdaten des Gullstrand-Augens. Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde. 2010;227:69–74.
70. Lotmar W. Theoretical eye model with aspherics*. J Opt Soc Am. 1971;61:1522.
71. Kooijman AC. Light distribution on the retina of a wide-angle theoretical eye. J Opt Soc Am. 1983;73:1544.
72. Liou HL, Brennan NA. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis. 1997;14:1684–95.
73. Navarro R. Adaptive model of the aging emmetropic eye and its changes with accommodation. J Vis. 2014;14:21,1–17.
74. Atchison DA, Thibos LN. Optical models of the human eye: optical models of the human eye. Clin Exp Optom. 2016;99:99–106.
75. Celsus AC. Aulus Cornelius Celsus über die Arzneiwissenschaft in 8 Büchern. 2. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn; 1906.
76. Celsus AC. A. Cornelii Celsi de medicinae. Daremburg C, Herausgeber. Leipzig: Teubner; 1859.
77. Celsus AC. De medicina libri VIII. Florenz: Handschrift; 1465.
78. Aëtios von Amida. Aetii Medici Graeci Contractae ex veteribus medicinae sermones XVI. Venedig: Johannes Gryphius; 1553.
79. Richter IA, Wells T, Kemp M. Leonardo da Vinci Notebooks. New York: Oxford University Press; 2008.
80. Clark K. The drawings of Leonardo Da Vinci in the collection of her majesty the queen at Windsor Castle; anatomical manuscripts A, B, C. 2. Aufl. Edinburgh: R. & R. Clark; 1935.
81. Conard NJ. A female figurine from the basal Aurignacian of Hohle Fels Cave in southwestern Germany. Nature. 2009;459:248–52.
82. Conard NJ, Kind C-J, Kretschmann W, Wolf C, Engler B. Als der Mensch die Kunst erfand: Eiszeithöhlen der Schwäbischen Alb. Darmstadt: Theiss; 2017.
83. UNESCO World Heritage Centre. UNESCO World Heritage Centre – Decision – 41 COM 8B.24 [Internet]. UNESCO World Heritage Centre. 2017. <http://whc.unesco.org/en/decisions/6896>. Zugegriffen: 6. Jan. 2018.
84. Urgeschichtliches Museum Blaubeuren/Venus [Internet]. <https://www.urmu.de/de/Forschung%2BArch%C3%A4ologie/Eiszeitkunst/Venus>. Zugegriffen: 6. Jan. 2018.

85. Heidenreich SM. Virtuelle Archäologie in Baden-Württemberg. Von der wissenschaftlichen Dokumentation zur öffentlichen Web-Präsentation von 3-D-Modellen archäologischer Denkmale. Denkmalpflege in Baden-Württemberg. 2014;43:261–4.
86. Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg. Iceageart: 3D [Internet]. High-Tech trifft Eiszeit. 2018. <https://www.iceageart.de/3d/>. Zugegriffen: 6. Jan. 2018.
87. Antl-Weiser W. Venus-forschung [Internet]. Naturhistorisches Museum Wien. 2017. <http://www.nhm-wien.ac.at/forschung/praehistorie/forschungen/venus-forschung>. Zugegriffen: 6. Jan. 2018.
88. Nigst PR, Haesaerts P, Damblon F, Frank-Fellner C, Mallol C, Viola B, et al. Early modern human settlement of Europe north of the Alps occurred 43,500 years ago in a cold steppe-type environment. Proc Natl Acad Sci. 2014;111:14394–9.
89. Teschler-Nicola M. Willendorf – die anthropologischen Quellen. Mitteilungen der Anthropologischen Ges in Wien. 2008;138:89–100.
90. Scan The World. 3D Printable Venus of Willendorf at The Naturhistorisches Museum, Vienna [Internet]. MyMiniFactory. 2015. <https://www.myminifactory.com/object/venus-of-willendorf-at-the-naturhistorisches-museum-vienna-11455>. Zugegriffen: 6. Jan. 2018.
91. Snow D. Sexual dimorphism in European Upper Paleolithic cave art. Am Antiq. 2013;78:746–61.
92. Pettitt P, Castillejo AM, Arias P, Peredo RO, Harrison R. New views on old hands: the context of stencils in El Castillo and La Garma caves (Cantabria, Spain). Antiquity. 2014;88:47–63.
93. Leroi-Gourhan A. Gesture and Speech. Cambridge: MIT Press; 1993.
94. Clottes J. Kunst im Morgenlicht der Menschheit. Spektrum der Wissenschaft. 2003.
95. v. Helmholtz H. Populäre wissenschaftliche Vorträge. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn; 1871.
96. Platon. Platons Werke. 2. Aufl. Berlin: Realschulbuchhandlung; 1817.
97. Platon. Timaeus und Kritias. Breslau: Georg Philipp Aderholz; 1841.
98. Ebers G, Herausgeber. Das Hermetische Buch über die Arzneimittel der alten Ägypter in hieratischer Schrift – Einleitung und Text. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1875.
99. Ebers G, Herausgeber. Das Hermetische Buch über die Arzneimittel der alten Ägypter in hieratischer Schrift – Glossar und Text. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1875.
100. Alexandrinus C. Clementis Alexandrini: Stromatum Liber Quintus. In: Potter J, Herausgeber. Clementis Alexandrini Opera quae extant. Venedig: Antonius Zatta; 1757.
101. Hirschberg J. Geschichte der Augenheilkunde. In: Seamisch T, Graefe A, Herausgeber. Handbuch der gesamten Augenheilkunde. 2. Aufl. Leipzig: W. Engelmann; 1899.
102. Plinius GS. Arzneimittel vom Menschen, vom Wasser und von den Thieren. Leipzig: Gressner & Schramm; 1882.
103. Paullin KF. Heilsame Dreck-Apotheke. Frankfurt: Friedrich Knochen; 1697.
104. Lewis W, Rotheram J, Lavoisier AL. Neues Edinburger Dispensatorium (The Edinburgh new dispensatory). Black J, Herausgeber. Leipzig: Gerhard Fleischer der Jüngere; 1793.
105. Hornung E. Der ägyptische Mythos von der Himmelskuh. 3. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht; 1982.
106. Maul SM, Herausgeber. Das Gilgamesch-Epos. 7. Aufl. München: Beck; 2017.
107. Kratz RG, Speckermann H, Herausgeber. Das erste Buch Mose Genesis: die Urgeschichte Gen 1–11. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht; 2018.
108. Aristoteles. Die Metaphysik des Aristoteles. Berlin: L. Heimann; 1871.
109. Homer. Homers Ilias. 2. Aufl. Königsberg: Friedrich Nicolovius; 1802.
110. Diels H. Die Fragmente der Vorsokratiker. 2. Aufl. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung; 1906.
111. Nietzsche F. Friedrich Nietzsche Gesammelte Werke. München: Musarion; 1921.

112. Aristoteles. Vier Bücher über das Himmelsgebäude und Zwei Bücher über Entstehen und Vergehen. Prantl C, Herausgeber. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1857.
113. Huygens C. Traite de la lumiere. Leiden: Pierre van der Aa; 1690.
114. Descartes R. Discours de la methode pour bien conduire sa raison, & chercher la verité dans les sciences: plus la dioptrique et les meteores, qui sont des essais de cette methode. Paris: Theodore Girard; 1657.
115. Descartes R. Entwurf der Methode: mit der Dioptrik, den Meteoren und der Geometrie. Hamburg: Felix Meiner; 2013.
116. Huygens C. Abhandlung über das Licht. Lommel E, Herausgeber. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1890.
117. Newton I. Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. 4. Aufl. London: William Innys; 1730.
118. Hermann A. Einstein auf der Salzburger Naturforscherversammlung 1909. Phys J. 1969;25:433–6.
119. Einstein A. Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. Phys Z. 1909;10(22):817–25.
120. Einstein A. Äther und Relativitätstheorie: rede gehalten am 5. Mai 1920 an der Reichsuniversität zu Leiden von Albert Einstein. In: Janssen M, Schulmann R, Illy J, Lehner C, Buchwald DK, Herausgeber. The Berlin years: writings, 1918.–1921. Berlin: Julius Springer; 1920.
121. Einstein A. Über den Äther. 1924. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=sng-005:1924:105::623>. Zugegriffen: 5. Okt. 2018.
122. Bohr N. Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In: Schilpp PA, Herausgeber. Albert Einstein, philosopher-scientist. Evanston: Library of Living Philosophers; 1949.
123. Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? Phys Rev. 1935;47:777–80.
124. Nobel Media AB. The nobel prize in physics 1954 [Internet]. Nobelprize.org. 2018. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1954/summary/>. Zugegriffen: 5. Okt. 2018.
125. Planck M. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. In: König A, Herausgeber. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft im Jahre 1900. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1900. S. 237–45.
126. Nestle W, Herausgeber. Die Vorsokratiker in Auswahl übersetzt und herausgegeben. Jena: Eugene Diederichs; 1908.
127. Mansfield DF, Wildberger NJ. Plimpton 322 is Babylonian exact sexagesimal trigonometry. Historia Math. 2017;44:395–419.
128. Freudenthal J. Alexander Polyhistor und die von ihm erhaltenen Reste jüdischer und samaritanischer Geschichtswerke. Jahresbericht des jüdisch-theologischen Seminars Fraenkel'scher Stiftung. Breslau: Grass, Barth und Comp.; 1874.
129. Apelt O, Herausgeber. Diogenes Laertius: Leben und Meinungen berühmter Philosophen; Buch VII–X. Leipzig: Felix Meiner Verlag; 1921.
130. Kittler FA, Berz P, Strauss J, Weibel P, Scharbert G. Götter und Schriften rund ums Mittelmeer. 2017.
131. Phillipson L. *Hylē anthrōpinē*: Pars I. De internarum humani corporis partium cognitione Aristotelis cum Platonis sententiis comparata. Pars II. Philosophorum veterum usque ad Theophrastum doctrina de sensu. Theophrasti de sensu et sensilibus fragmentum ... Aristotelis Doctrina de sensibus. Theophrasti fragmenta de sensu, phantasia et intellectu e Prisciani metaphrasi primum excerpta. Berlin: A. List; 1831.
132. Magnus H. Die Augenheilkunde der Alten. Breslau: J. U. Kern's (Max Müller); 1901.

133. Wendt A. H. Ritter, Geschichte der Philosophie 1.-3- Theil (2. Artikel). *Jahrbücher für wissenschaftliche Kritik*. 1832;45:345–52.
134. Baylens P. Peter Baylens Philosophisches Wörterbuch. Jakob LH, Herausgeber. Halle: Johann Gottfried Ruff; 1797.
135. Ritter H. Geschichte der Philosophie. 2. Aufl. Hamburg: Friedrich Perthes; 1836.
136. Haas AE. Antike Lichttheorien. In: Stein L, Herausgeber. Archiv für Philosophie. Berlin: Georg Reimer; 1907. S. 345–86.
137. Diels H. Die Fragmente der Vorsokratiker. 4. Aufl. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung; 1922.
138. Bischoff M. Interview: Das Universum als zellürer Automat. Spektrum – Die Woche. Ausgabe 47;2018:20–3.
139. Theophrast. Pars II. *Philosophorum veterum usque ad Theophrastum doctrina de sensu*. In: Phillipson L, Herausgeber. *Hylē anthrōpinē Scripsit et edidit Ludovicus Philippson*. Berlin: J. A. List; 1831.
140. Marx K. Über die Differenz der demokritischen und epikureischen Naturphilosophie. Ergänzungsband: Schriften bis 1844. Berlin: Dietz; 1968. S. 264.
141. Lucretius CT. *De Rerum Natura*. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung; 1923.
142. von Goethe JW. *Goethe's saemmtliche Werke*. Paris: Tetot Freres; 1836.
143. Lucretius CT. *Von der Natur der Dinge*. 2. Aufl. Leipzig: Georg Joachim Göchen; 1831.
144. Xenophon. Isokrates Panegyrikos. Xenofons Gastmahl. Xenofons sokratische Gespräche. Wien: Anton Dell; 1813.
145. Xenophon. *Oikonomikos oder Xenophon vom Haus-Wesen*. Hamburg: König und Richter; 1734.
146. Platon. *Apologie des Sokrates und Kriton*. Leipzig: Felix Meiner; 1919.
147. Platon. *Platons Dialog Phaidon*. Leipzig: Felix Meiner; 1913.
148. Platon. *Der Staat*. Schleiermacher F, Herausgeber. Berlin: G. Reimer; 1828.
149. Aristoteles. *Aristoteles über die Seele*. Aus dem Griechischen übersetzt und mit Anmerkungen begleitet. Frankfurt: Johann Herrl; 1794.
150. Aristoteles. *Aristotelis Stagiritae Parua quae vocant naturalia. De sensu & sensili. De memoria & reminiscentia. De somno & vigilia. De Insomnijs. De diuinatione per somnia. De animalium motione. De animalium incessu. De extensione & breuitate vitae. De iuuentute & senectute, morte & vita, & de spiratione. Omnia in latinum conuersa, & antiquorum more explicata a Nicolao Leonico Thomaeo. Eiusdem opuscula nuper in lucem edita. Item eiusdem dialogi, quotquot extant. de Colines S, Herausgeber*. Paris: Simonem Colinaeum; 1530.
151. Koelbing HM. *Zur Sehtheorie im Altertum: Alkmeon und Aristoteles*. Sauerländer. 1968;
152. Euklid. *Euklid's Elemente*. Fünfzehn Bücher aus dem Griechischen übersetzt. 5. Aufl. Mollweide CB, Herausgeber. Halle: Buchhandlung des Waisenhauses; 1824.
153. Meschkowski H. Denkweisen großer Mathematiker: Ein Weg zur Geschichte der Mathematik [Internet]. Wiesbaden: Vieweg+Teubner; 1990. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:1111-2012041134>. Zugegriffen: 16. Febr. 2019.
154. Euklid. *Euclidis Optica & Catoptrica è Greco*. Paris: Andreas Wecheli; 1557.
155. Euklid. *Euclides Latinus*. Ps.-Robertus Grosseteste. Alfraganus. Geber. Thüringer Universitäts- und Landesbibliothek Jena: Handschrift; 14. Jhdt.
156. Tūsī N al-DM ibn M. Arabic versions of seven Greek treatises on mathematics. British Library: Oriental Manuscripts: Handschrift; 1198.
157. Lindberg DC. *Theories of vision. From Al-Kindi to Kepler*. Chicago: The University of Chicago Press; 1976.
158. Euklid. *Euclidis Optica, Opticorum Recensio Theonis, Catoptrica*. In: Heiberg JL, Herausgeber. *Euclidis opera omnia*. Leipzig: B. G. Teubner; 1895.

159. Eco U. Die geheimnisvolle Flamme der Königin Loana: illustrierter Roman. Ungekürzte Ausg. München: dtv; 2006.
160. Lobatschewski NI. Zwei Geometrische Abhandlungen. Leipzig: B. G. Teubner; 1898.
161. Reichardt H. Gauß und die Anfänge der nicht-euklidischen Geometrie. 1. Aufl. Leipzig: Teubner; 1985.
162. Gauss CF. Allgemeine Flächentheorie (Disquisitiones generales circa superficies curvas) 1827. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1889.
163. Riemann B. Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen. Berlin: Springer; 1919.
164. Cranz C. Gemeinverständliches über die sogenannte vierte Dimension. Stuttgart: Verlagsanstalt und Druckerei A.G. (cvormals J. F. Richter); 1890.
165. Minkowski H. Raum und Zeit. (Vortrag gehalten auf der 80. Naturforscher-Versammlung zu Köln am 21. Sept. 1908). In: Hilbert D, Herausgeber. Gesammelte Abhandlungen von Herbert Minkowski. Leipzig: B. G. Teubner; 1911. S. 431–44.
166. Archimedes, Sturm JC. Des unvergleichlichen Archimedis Sand-Rechnung/oder tiefsinngie Erfindung einer, mit verwunderlicher Leichtigkeit aussprechlichen, Zahl, welche er unfehlbar beweiset grösser zu seyn als die Anzahl aller Sandkörlein, mit welchen die Höhle der ganzen Welt könnte ausgefüllt werden. Nürnberg: Paul Fürstens; 1667.
167. Ptolemäus C. Ptolemy's theory of visual perception: an english translation of the optics. Philadelphia: The American Philosophical Society; 1996.
168. Ptolemäus C. Liber de optica. Staatsbibliothek zu Berlin: Handschrift; 14. Jhd.
169. Ptolemäus C, Delambre J-BJ. Die Optik des Ptolemäus, verglichen mit der Euclid's Alhazen's und Vitellio's, von Delambre. In: Gilbert LW, Herausgeber. Annalen der Physik. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1812. S. 371–88.
170. Ptolemäus C. L'Ottica Di Claudio Tolomeo. Govi G, Herausgeber. Turin: G. B. Paravia; 1885.
171. Cicero MT. Cicero's philosophische Schriften. In deutschen Uebertragungen. Klotz R, Herausgeber. Leipzig: Carl Focke; 1840.
172. Ingenkamp HG. Zur stoischen Lehre vom Sehen. Rhein Mus Philol (NF). 1971;114:240–6.
173. Haeckel E. Die Welträthsels. Gemeinverständliche Studien über monistische Philosophie. Bonn: Emil Strauss; 1899.
174. de Lavoisier AL, de Laplace P-S. Expériences sur la respiration des animaux: mémoire sur la chaleur, altérations qu'éprouve l'air respiré.
175. Galen. On the Doctrines of Hippocrates and Plato. – De placitis Hippocratis et Platonis. Akademie. 2. Aufl. Berlin; 2005.
176. Alhazen. MXI. (Cod. 201 Gol.) Commentarius ad Ibno-'l-Haithami. Catalogus codicum orientalium bibliothecae Academiae Lugduno-Batavae. Leiden: E. J. Brill; 1865. S. 61–2.
177. Wiedemann E. Ueber „Die Darlegung der Abhandlung über das Licht“ von Ibn al Haitam. Annalen der Physik und Chemie. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1883. S. 337–45.
178. Ibn-al-Haiṭam al-Hasan I-Ḥasan. Abhandlungen zur Optik. 1246.
179. Baermann J. Abhandlung über das Licht von Ibn al-Haitam. Z der Dtsch Morgenl Ges. 1882;36(2):195–237.
180. Fehrenbach F. Der oszillierende Blick. Sfumato und die Optik des späten Leonardo. Z Kunstgesch. 2002;65:522–44.
181. Herzfeld M. Leonardo da Vinci: Der Denker, Forscher und Poet. 2. Aufl. Jena: Eugen Diederichs; 1906.
182. da Vinci L. Pariser Manuskript D [Internet]. Paris: Handschrift; 1508.
183. Isaacson W. Leonardo da Vinci: the biography. 2017.
184. Noest AJ, Kemp M. No refraction in Leonardo's orb. Nature. 2011;480:457.

185. Kepler J. *Ad Vitellionem Paralipomena: Astronomiae pars Optica Traditur*. Frankfurt a. M.: Claud Marne & Johannes Aubers; 1604.
186. Kepler J., Hammer F [Hg. /Red.], Dyck W von [Hg. /Red.], Caspar M [Hg. /Red.]. *Gesammelte Werke. Astronomiae pars optica*. München; 1939.
187. Kepler J. *Dioptrice seu demonstratio eorum quae visui & visibilibus propter Conspicilla ita pridem inventa accidentunt*. Augsburg: Davidis Franci; 1611.
188. Kepler J. *Dioptrik oder Schilderung der Folgen, die sich aus der unlängst gemachten Erfindung der Fernrohre für das Sehen und die sichtbaren Gegenstände ergeben*. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1904.
189. Descartes R, v. Kirchmann JH. *René Descartes' philosophische Werke. Erste Abtheilung. Lebensbeschreibung. Abhandlung über die Methode*. Berlin: L. Heimann; 1870.
190. Newton I. *Sir Isaac Newton's Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts*. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1898.
191. Le Stierlin H. *Buste de Néfertiti: Une imposture de l'égyptologie?*. Gollion: Infolio; 2009.
192. Borchardt L. *Porträts der Königin Nofret-Ete*. Leipzig: J. C. Hinrichssche Buchhandlung; 1923.
193. Illerhaus B, Staude A, Meinel D. *Das zweite Gesicht der Nofretete*. ZfP-Zeitung. 2009.
194. Schelper T. *Vom Original zum Malmodell: Die Bemalung der neuen Replik der Nofretete-Büste der Gipsformerei, Staatliche Museen zu Berlin*. Berliner Beiträge zur Archäometrie, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft. Berlin: Rathgen-Forschungslabor, Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz; 2016.
195. Merz M. *Das neue Abbild der Schönen: 3D-Scantechniken ermöglichen objektive Reproduktion der Nofretete-Büste*. Restauro. 2009;115:154–155.
196. Bürja A. *Der mathematische Maler oder gründliche Anweisung zur Perspektive*. Berlin: Christian Gottfried Schöne; 1795.
197. Wilde E. *Geschichte der Optik, vom Ursprunge dieser Wissenschaft bis auf die gegenwärtige Zeit*. Berlin: Rücker und Püchler; 1838.
198. Wilde E. *Ueber die Optik der Griechen*. In: Köpke GGS, Herausgeber. *Ladung zu der öffentlichen Prüfung der Zöglinge des Berlinischen Gymnasiums zum Grauen Kloster*. Berlin: Dieterleische Buchhandlung; 1832.
199. President's Challenge. *MythBusters*. USA: Discovery Channel; 2010.
200. Plutarch. *Biografien des Plutarchs*. Berlin: George Jacob Decker; 1777.
201. Vitruv, Reber F, Schneider G. *Zehn Bücher über Architektur: De architectura libri decem*. 3. Aufl. Reber 2015. Rom/Wiesbaden: Matrixverlag; um 20 v. Chr.
202. Aristoteles. *The Poetics of Aristotle*. 3. Aufl. London: MacMillan and Co.; 1902.
203. Dörpfeld W, Reisch E. *Das griechische Theater: Beiträge zur Geschichte des Dionysos-Theaters in Athen und anderer griechischer Theater*. Athen: Barth & von Hirst; 1896.
204. Stangl G. *Antike Populationen in Zahlen*. Frankfurt a. M.: Lang; 2008.
205. Cicero MT. *Von dem Redner. Drei Gespräche*. Altona: Johann Friedrich Hammerich; 1801.
206. Lukian von Samosata. *Lucian's Werke*. Tafel GLF, Osiander CN, Schwab G, Herausgeber. Stuttgart: J. B. Metzlersche Buchhandlung; 1830.
207. Polybios von Megalopolis. *Geschichte des Polybius*. Berlin: Georg Ludewig Winter; 1762.
208. Klein HA. *Science of measurement: a historical survey*. New York: Dover Publications; 2012.
209. Plinius GS. *Die Naturgeschichte des Cajus Plinius Secundus*. Leipzig: Gressner & Schramm; 1882.
210. Zöllner F. *Sandro Botticelli als Apelles und als Grisaillemaler. Petronius' „Monocremos“ als Inspiration für die Selbstreferentialität der Malerei?* In: Lehmann C, Gramaccini N, Rößler J, Dittelbach T, Herausgeber. *Chiaroscuro als ästhetisches Prinzip Kunst und Theorie des Hell-dunkels 1300–1550*. Berlin: De Gruyter; 2018. S. 91–104, 400.

211. von Sandrart J. Deutsche Academie der Bau-Bildhauer- und Maler-Kunst, Dritter Theil. Volkmann JJ, Herausgeber. Nürnberg: Johann Andreas Endter; 1774.
212. Schürer M. Die Enzyklopädie der berühmten Männer und Frauen: Domenico Bandini, sein Fons memorabilium universi und die kompilatorische Biographik der Renaissance. Tübingen: Mohr Siebeck; 2017.
213. Böttlinger CA. Ideen zur Archäologie der Malerei. Erster Theil. Dresden: Waltersche Hofhandlung; 1811.
214. Mau A. Geschichte der decorativen Wandmalerei in Pompeji. Berlin: G. Reimer; 1882.
215. Mau A. Führer durch Pompeji. 2. Aufl. Leipzig: Wilhelm Engelmann und F. Furchheim; 1896.
216. Pugliese Carratelli G. Pompei: pitture e mosaici. Documentazione nell'opera di disegnatori e pittori dei secoli XVIII e XIX. 1990. Aufl. Rom: Istituto della Enciclopedia Italiana; 1911.
217. Beacham R, Denard H, Baker D, Blazeby M. Skenographia Homepage [Internet]. The Skenographia Project. 2002. <http://www.skenographia.cch.kcl.ac.uk/index.html>. Zugegriffen: 30. Juli 2016.
218. Blazeby M. House of Apollo [Internet]. Perspective Analysis. 2007. http://www.kvl.cch.kcl.ac.uk/wall_paintings/apollo/perspective/default.htm. Zugegriffen: 30. Juli 2016.
219. Panofsky E. Aufsätze zu Grundfragen der Kunsthistorie. Oberer H, Verheyen E, Herausgeber. Berlin: Volker Spiess; 1980.
220. Zahn W. Die schönsten Ornamente und merkwürdigsten Gemälde aus Pompeji, Herculaneum und Stabiae nach den an Ort und Stelle gemachten Originalzeichnungen. Berlin: G. Reimer; 1842.
221. Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen. Bayerische Schlösserverwaltung | Schlösser | Pompejanum [Internet]. https://www.schloesser.bayern.de/deutsch/schloss/objekte/as_pom.htm. Zugegriffen: 19. März 2019.
222. Damianos von Larissa. Damianos Schrift über Optik. Mit Auszügen aus Geminus, Griechisch und Deutsch. Schöne R, Herausgeber. Berlin: Reichsdruckerei; 1897.
223. Drecker J. Das Planisphaerium des Claudius Ptolemaeus. Isis. 1927;9:255–78.
224. Ptolemäus C. Planisphaerium. Commandino F, Herausgeber. Venedig: Aldus; 1558.
225. Schnyder R. Zur Entdeckung der wissenschaftlichen Perspektive in der Antike. Z Schweiz Archäol Kunstgesch. 1962;22:143–157.
226. Neugart T. Episcopatus Constantiensis Alemannicus. St. Blasien: Typis S. Blasii; 1803.
227. Bayerische Akademie der Wissenschaften. Mittelalterliche Bibliotheken (ca. 500–1500 n.Chr.) [Internet]. Mittelalterliche Bibliothekskataloge Deutschlands und der Schweiz (MBK). <http://www.mbk.badw.de/bibliothekskataloge.html>. Zugegriffen: 23. März 2019.
228. Schmidt D. UNESCO-Welterbe Klosterinsel Reichenau in Baden-Württemberg. Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, Herausgeber. Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart; 2013.
229. Vasari G. Le vite de piu eccellenti architetti, pittori, et scultori italiani, da Cimabue insino a' tempi nostri. Florenz: Torrentino; 1550.
230. Vasari G, Nova A, Lorini V. Die Edition Giorgio Vasari: Giorgio Vasari Lebensläufe der hervorragendsten Künstler: Gesamtausgabe. Berlin: Klaus Wagenbach; 2004.
231. Florenski PA. Die umgekehrte Perspektive: Texte zur Kunst. München: Matthes & Seitz; 1989.
232. von Phourna Dionysios. Das Handbuch der Malerei vom Berge Athos. Trier: Verlag d. Fr. Lintz'schen Buchhandlung; 1855.
233. Tauchert S. Form und Funktion von Perspektive in der englischen Lyrik des 16. und 17. Jahrhunderts. Norderstedt: Books on Demand; 2007.
234. Peckham J. Jo. Archiepiscopi Cantuariensis Perspectiva communis. Gauricus L, Herausgeber. Venedig: Io. Baptistam Sessam; 1504.

235. Bacon R. Rogerii Baconis Angli, Viri Eminentissimi Perspectiva. Combach J, Herausgeber. Frankfurt: Wolfgang Richter; 1614.
236. Ghiberti L. Lorenzo Ghibertis Denkwürdigkeiten (I Commentarii). Zum ersten Mal nach der Handschrift der Biblioteca Nazionale in Florenz vollständig herausgegeben und erläutert. von Schlosser J, Herausgeber. Berlin: Julius Bard; 1912.
237. Schwarz MV, Theis P. Giottus pictor. Wien: Böhlaus; 2004.
238. Alighieri D. Die göttliche Komödie. Berlin: Enslin'sche Buchhandlung; 1842.
239. Boccaccio G. Das Dekameron. Zweiter Theil. 2. Aufl. Leipzig: F. A. Brockhaus.
240. Comune di Siena. Sala dei Nove – Museo Civico – Strutture Museali – Cultura – La Città – Comune di Siena [Internet]. <http://www.comune.siena.it/La-Citta/Cultura/Strutture-Museali/Museo-Civico/Sala-dei-Nove>. Zugriffen: 31. März 2019.
241. Schmidt D. Der Freskenzyklus von Ambrogio Lorenzetti über die gute und schlechte Regierung [Elektronisches Medium]: eine danteske Vision im Palazzo Pubblico von Siena [Dissertation]. St. Gallen: Universität St.Gallen; 2003.
242. Zöege von Manteuffel K. Die Gemälde und Zeichnungen des Antonio Pisano aus Verona. Halle a. S.: Buchdruckerei der „Rev. Ztg.“; 1909.
243. Vallardi G. Disegni di Leonardo da Vinci. Mailand: Pietro Agnelli; 1855.
244. Pisanello. Pisanello: le peintre aux sept vertus; Musée du Louvre, Paris, 6 mai – 5 août 1996. Réunion des Musées Nationaux, Herausgeber. Paris: Éd. de la Réunion des Musées Nationaux; 1996.
245. Uffizi Galleries. Adoration of the Magi | Artworks | Uffizi Galleries [Internet]. Gli Uffizi. <https://www.uffizi.it/en/artworks/adoration-of-the-magi>. Zugriffen: 31. März 2019.
246. Dvořák M. Geschichte der italienischen Kunst: Das 14. und 15. Jahrhundert. München: R. Piper & Co.; 1927.
247. Verdon T, Zolli DM, Museum of Biblical Art, Opera di Santa Maria del Fiore, Exhibition Sculpture in the Age of Donatello: Renaissance Masterpieces from Florence Cathedral, Herausgeber. Sculpture in the age of Donatello: Renaissance masterpieces from Florence Cathedral; [...] accompanies the Exhibition Sculpture in the Age of Donatello: Renaissance Masterpieces from Florence Cathedral ... on display at the Museum of Biblical Art from February 20 to June 14, 2015]. London: Giles [u.a.]; 2015.
248. Arndt EM. Ernst Moritz Arndts Reisen durch einen Theil Teutschlands, Ungarns, Italiens und Frankreichs in den Jahren 1798 und 1799. 2. Leipzig: Heinrich Gräff; 1804.
249. von Fabriczy C. Filippo Brunelleschi. Sein Leben und seine Werke. Stuttgart: Cotta'sche Buchhandlung; 1892.
250. Manetti A, Perrone C. Vita di Filippo Brunelleschi. Roma: Salerno Editrice; 1992.
251. Cramer T, Herausgeber. Wege in die Neuzeit. München: W. Fink; 1988.
252. Gernrath JohK. Abhandlung der Bauwissenschaften oder Theoretisch-praktischer Unterricht in der bürgerlichen Bauskunst, dem Strassenbau, und in der Hydrotechnik oder Wasserbaukunst für angehende Ingenieurs, Hydrotekten, Bauleute, Brunnenmeister und Müller, dann zum Gebrauch der Wirthschaftsämter. Brünn: J. G. Gastl; 1825.
253. Alberti LB. Drei Bücher über die Malerei (Della Pictura libri tre). Leone Battista Alberti's kleinere kunsttheoretische Schriften Im Originaltext herausgegeben. Wien: Wilhelm Braumüller; 1877.
254. Schäffner W. Euklids Zeichen. Zur Genese des analogen Codes in der Frühen Neuzeit. In: Bredekamp H, Bruhn M, Werner G, Herausgeber. Mathematische Forme(l)n. Berlin: Akademie; 2017. S. 62–73.
255. Alberti LB. Della Pittura e della Statua di Leonbattista Alberti. Giusti F, Herausgeber. Mailand: Dalla Societa Tipografica de Classici Italiani; 1804.

256. Panofsky E. Das perspektivische Verfahren des Leone Battista Albertis. *Kunstchronik*. 1914;26:506–16.
257. Della Francesca P. *De prospectiva pingendi*. Gizzi C, Herausgeber. Venedig: Edizioni Ca' Foscari – Digital Publishing; 2016.
258. Della Francesca P. Petrus Pictor Burgensis. *De prospectiva pingendi*. Bordeaux: Handschrift ms. 616; 1460.
259. Burgensis PP. *De Perspectiva Pingendi*. Strassburg: Heitz & Mündel; 1899.
260. Pacioli L. *Summa de arithmeticā geometriā. Proportioni: et proportionalitā*. 2. Aufl. Toscolano: Paganino; 1523.
261. Pacioli L, Pendorf B. *Abhandlung über die Buchhaltung* 1494. 3., unveränd. Repr. der Ausg. von 1933. Stuttgart: Schäffer-Poeschel; 2009.
262. Pacioli L, Da Vinci L. *Divina proportione*. Venedig: A. Paganini Paganinus; 1509.
263. Pacioli L. *Fra Luca Pacioli Divina Proportione. Die Lehre vom Goldenen Schnitt*. Eitelberger v. Edelberg R, Ilg A, Herausgeber. Wien: Carl Graeser; 1889.
264. Della Francesca P. *De quinque corporibus regularibus et de corporibus irregularibus. Codex Urbinus Latinus*. Rom: Handschrift Urb.lat.632; 1476. S. 1r–68r.
265. Jordan M. Der vermisste Traktat des Piero della Francesca über die fünf regelmäßigen Körper. In: Bode W, Dohme R, Grimm H, Jordan M, Lippmann Fr, Herausgeber. *Jahrbuch der Königlich Preussischen Kunstsammlungen*. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung; 1880. S. 112–8.
266. Da Vinci L, Della Bella S. *Trattato della pittura*. 1792. Aufl. Florenz: Pagani & Grazioli; 1792.
267. Da Vinci L. *Des vortrefflichen Florentinischen Mahlers Lionardo da Vinci höchst-nützlicher Tractat von der Mahlerey*. Nürnberg: Christoph Weigel; 1747.
268. Da Vinci L. *Das Buch von der Malerei. Nach dem Codex vaticanus (Urbinas)* 1270. Ausgabe 1882. Melzi F, Ludwig H, Herausgeber. Wien: Wilhelm Brahmüller; 1519.
269. Da Vinci L. *The Notebooks of Leonardo da Vinci*. 1955. Aufl. MacCurdy E, Herausgeber. Florenz: George Braziller; 1955.
270. Dürer A. *Underweysung der Messung, mit dem Zirckel und Richtscheit, in Linien ebenen unnd gantzen Corporen*. Nürnberg: Hieronymus Formschneyder; 1538.
271. Encyclopædia Britannica. Definition of PERSPECTOGRAPH Merriam-Webster [Internet]. Merriam-Webster. 2017. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/perspectograph>. Zugegriffen: 1. Januar 2018.
272. Schiffner F. *Über Photogrammetrie und ihre Anwendung bei Terrainaufnahmen. Mittheilungen aus dem Gebiete des Seewesens*. Wien: Druck und Commission-Verlag Carl Gerolds Sohn.
273. Hauck G. *Mein perspektivischer Apparat. Fortschritte der Physik im Jahre 1884 Dargestellt von der physikalischen Gesellschaft zu Berlin*. Berlin; 1890.
274. Photogrammetrie und Luftbildwesen. *Handbuch der wissenschaftlichen und angewandten Photographie*. Wien: Julius Springer; 1930.
275. Ritter H. *Perspectograph: Apparat zur Herstellung der Perspective aus geometrischen Figuren*. 2. Frankfurt a. M.: J. Maubach & Co.; 1884.
276. da Vignola GB. *Le due regole di prospettiva practica*. Danti E, Herausgeber. Rom: Francesco Zannetti; 1583.
277. Shickman A. „Turning Pictures“ in Shakespeare's England. *Art Bull*. 1977;59:67.
278. Bettini M. *Apulia Universae Philosophiae Mathematicae*, Bd. 1. Bologna; 1642.
279. Schott C. *Magia Universalis Naturae et Artis*. Frankfurt: Schönwetter; 1657.

280. Grasnick A. 3D ohne 3D-Brille: Handbuch der Autostereoskopie. Springer; 2016.
281. Nommensen K-U. Pastorenehepaar nach 350 Jahren auf Reisen [Internet]. Kirchenkreis Nordfriesland. 2013. http://www.nordfriesland-evangelisch.de/42.0.html?&tx_ttnews%5Btt_news%5D=24&cHash=7e4e0fd2478b14a6e3077dd215a3f71a. Zugegriffen: 26. Aug. 2016.
282. Ucke C, Schlichting H-J. Morphing, Zoom und 3D. Lamellen- und Linsenrasterbilder. Phys Unserer Zeit. 2010;41:43–6.



Bilder aus Licht

3

Die Aufzeichnung und Wiedergabe der Realität

Zusammenfassung

Seit dem Altertum wurde die Abbildung heller Objekte durch kleine Öffnungen auf zufällige Flächen beschrieben. Diese einfachste Art der Projektion funktioniert durchaus zufriedenstellend in einem abgedunkelten Raum und wurde unter der lateinischen Bezeichnung „Camera obscura“ bekannt. Die Verbesserung der Camera obscura mit Linsen oder Spiegeln führte nicht nur zu dem, was wir heute als Kamera kennen, sondern auch zu einer entgegengesetzten Überlegung. Könnte man nicht die Bilder im Inneren der Dunkelkammer außerhalb der Kammer darstellen? Diese Überlegung hatte eine magische Konsequenz, die *Laterna magica*. Deren ursprüngliche Einsatzzwecke zur Verbreitung von Angst und Schrecken waren schnell vergessen, als sich die Eignung der Zauberlampe auch für wissenschaftliche Ziele zeigte. Mit Beginn der Fotografie entwickelten sich Techniken zur Aufnahme und Projektion bewegter Szenen. Den Vorteilen des Filmtheaters standen nur wenige Nachteile gegenüber. Um einen Kinofilm zu sehen, musste man ins Kino gehen und die wiedergegebenen Bilder waren immer Aufnahmen aus der Vergangenheit. Das Sehen in Ferne, das Fernsehen, die Television, wurde erst mit der Entdeckung lichtempfindlicher Materialien möglich. Waren die ersten Fernseher noch große Apparate mit kleinem Bildfeld, so wurde mit der praktischen Anwendung der Flüssigkristalle auch die Fertigung großformatiger Flachbildschirme Realität.

3.1 Camera obscura

Bilder aus der Dunkelkammer

Schon Aristoteles wurde die Beobachtung der mehrfachen Abbildung der Sonne oder des Mondes durch ein Laubwerk oder Sieb zugeschrieben [1]. Eine „Camera obscura“ war zu allererst nur ein möglichst dunkler Raum, in dem ein helles Objekt (z. B. Sonne oder Mond) durch ein möglichst kleines Loch in der Wand auf die gegenüberliegende Wand zur Beobachtung projiziert wurde. Die Bezeichnung „Camera obscura“ ist dabei lediglich die lateinische Übersetzung des arabischen Ausdrucks „al-bayt al-muzlim“ für einen dunklen Raum. Diese einfache Beschreibung der Funktionsweise einer Lochkamera findet sich in Alhazens Buch der Optik [2], obgleich Alhazen sich noch nicht mit der Darstellung eines Bildes auf der Wand beschäftigt [3]. Alhazens „Camera obscura“ war also lediglich eine dunkle Kammer zur Beobachtung der Lichtausbreitung.

Beispiel

Die Beobachtung des Aristoteles lässt sich leicht an einem sonnigen Sommertag in einem Biergarten wiederholen. Eine schöne Beschreibung für dieses Experiment findet sich im zweiten „Buch der Erfindungen“ [4] im Abschn. „Vom Lichte. Wesen und Fortpflanzung des Lichtes“ (S. 351–352):

„Wer von unseren Lesern hätte, wenn er unter einem schattigen Baum saß, durch dessen Blätterlücken die Strahlen der Sonne auf die weiße Fläche einen Tischtuchs oder auf den hellen Kiesboden fielen, noch nicht verwundert die Bemerkung gemacht, daß alle die einzelnen Lichtflecke eine kreisrunde Gestalt besitzen ... ?

Es sind kleine Sonnenbildchen, in ihrer Form lediglich durch die äußere Form des lichtstrahlenden Lichtkörpers bedingt...“

Die zugehörige Illustration (Abb. 3.1) zeigt das bekannte Phänomen.

Deutlich seltener wird man die nachfolgend gezeichnete Lichterscheinung wahrnehmen (Abb. 3.2). Dazu müsste man sich in dem oben genannten Biergarten bei einer partiellen Sonnenfinsternis aufhalten und könnte dann die sickelartigen Projektionen der Himmelserscheinung wahrnehmen.

Der Naturphilosoph Roger Bacon war erwiesenermaßen nicht nur ein Kenner der Schriften des Aristoteles, sondern auch der des Alhazen [5] und somit mit den Grundzügen der Optik vertraut. Er beschrieb in seinem Buch „Von den Geheimen Wirkungen der Kunst und Natur“ im Kapitel „Von künstlichen Erscheinungen, wie die die Erfahrung giebt“ die optische Abbildung so, dass nicht nur eine Kamera interpretierbar erscheint, sondern sogar ein Mikroskop oder Teleskop [6]:

„In der That es werden ganz wunderbare natürliche Vorstellungen der Strahlen gefunden. Denn die durchsichtigen Dinge und Spiegel können so gemacht werden, daß ein einziges



Abb. 3.1 Sonnenbilder bei freier Sonne, A. Dressel (1898) aus [4], S. 352

Ding scheinet als wären dessen sehr viele, und ein einziger Mensch, als wäre er ein ganzes Heer, ja daß viele, und so viel wir wollen, Sonnen und Monden sichtbar werden. Denn die Natur giebt den Dünsten manchmahl eine solche Gestalt, daß zwei Sonnen und zweien Monden, ja auch manchmahl drey Sonnen zugleich in der Luft sich sehen lassen; wie Plinius in seiner Naturhistorie erzählt. Auf gleiche Weise können viele ja unzählige Dinge als eine einzige Sache scheinen; denn wenn eine Sache vollkommener ist, als man von ihr fordert, so hat sie keine bestimmte Zahl mehr, wie Aristoteles vorgiebt in dem Kapitel vom Raum. ... Denn das sichtbare kann eine solche Gestalt annehmen, daß das, was sehr weit entfernt ist, scheinet als sey es sehr nahe, und so auch umgekehrt. So, daß wir in einer unglaublichen Entfernung die kleinsten Buchstaben lesen, und die kleinsten Dinge zählen können, und uns Sterne als sichtbare vorstellen können, wo wir wollen.“

Man kann erkennen, dass Bacon in seiner Schrift besonders auf die vielfache Abbildung durch unzählige Lochblenden im Sinne einer Aristotelesschen Blätterkrone abstellt, aber auch eindeutig auf eine optische Vergrößerung (oder Verkleinerung) hinweist.

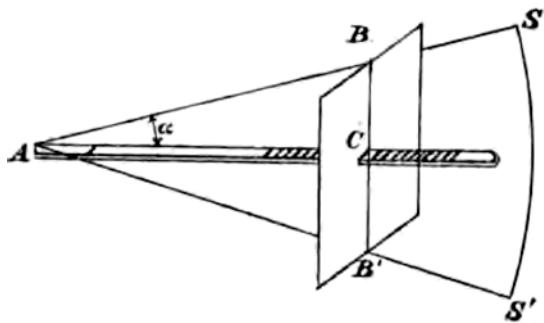


Abb. 3.2 Sonnenbilder bei partialer Sonnenfinsternis, A. Dressel (1898) aus [4], S. 353

In dem philosophischen Werk „Milchamot Ha-schem“ [7], zu Deutsch „Die Kämpfe Gottes“ [8], behandelt der Religionsgelehrte, Mathematiker und Astronom Levi Ben Gershon ab 1317 die großen Fragen seiner Zeit:

1. Die Unsterblichkeit der Seele
2. Die Offenbarung der Zukunft
3. Das göttliche Wissen von den Dingen
4. Die göttliche Providenz (die Vorsehung)
5. Die Himmelskörper, ihre Beweger, ihr gegenseitiges Rangverhältnis, ihr Verhältnis zu Gott
6. Die Entstehung der Welt

Abb. 3.3 Revelator secretorum, Anton von Braunmühl (1900) aus „Geschichte der Trigonometrie“ [13], S. 104



Für die Erforschung der Himmelskörper setzte Gershon ein einfaches Gerät namens „Revelator secretorum¹“ ein, welches ausführlich in der Schrift „De sinibus, chordis et arcubus²“ aus dem Jahre 1342 beschrieben wird. Das später als Jakobsstab bekannte Hilfsmittel diente der Bestimmung des Höhenwinkels eines Himmelskörpers mittels Triangulation. Dabei wurde eine senkrechte Tafel solange auf einem Stab verschoben, bis man über die Strecke AB (Visierlinie) den Stern anvisieren konnte (Abb. 3.3). Aus der abgelesenen Teilung des Stabes ergibt sich nun der Winkel α . Gershon berechnete den Winkel über den Sinus und fügte zum Zwecke der Umrechnung eine Sinustafel ein.

Im gleichen Werk geht Gershon auch auf die Camera obscura ein. Goldstein beschreibt den Aufbau wie folgt (aus [14], S. 156):

„Das beschriebene Instrument ist eine Kombination des Jakobsstabs und der Camera obscura, wobei der Stab 16 oder mehr Spannen³ (d. H. größer als etwa 3 m) sein muss. An einem Ende des Stabes befindet sich eine Platte mit einem kreisförmigen Loch, dessen Durchmesser einer oder zwei Einheiten entspricht⁴ durch die das Licht des Leuchtkörpers eintritt. Am anderen Ende des Stabes befindet sich ein Bildschirm parallel zu der Platte, auf der das Bild des Gestirns zu sehen ist.“

Einen interessanten Rückgriff auf die ursprüngliche Bedeutung des Begriffes Camera obscura macht Curtze in seinem Artikel „Die Dunkelkammer“, der Gershons

¹Offenbarer der Geheimnisse.

²Die Schrift wurde in der lateinischen Übersetzung von Petrus de Alexandria überliefert [9]. Eine Schrift mit dem identischen Titel „De sinibus, chordis et arcubus“ wurde von Johannes von Gmunden in Wien im Jahre 1437 verfasst. Nach Busard, der das Werk 1971 nochmals kommentiert herausgegeben hat [10], bezieht sich von Gmunden aber u. a. auf die „Canones Tabularum primi mobilis“ von Johannes de Lineriis aus dem Jahre 1322, insbesondere auf dessen Sinustafeln (s. s. [11]) und Bruchrechnung (s. a. [12]).

³Eine Spanne ist: „...der Abstand zwischen dem ausgestreckten Daumen und dem ebenfalls ausgestreckten kleinen Finger, und wird zu 9 Zoll geschätzt...“ (aus [15], S. 248).

⁴Da jede Einheit 1/8 einer Spanne ist, beträgt der Wert für eine Einheit 25 mm. Das Loch hatte also einen Durchmesser zwischen 25 und 50 mm.

lateinischen Text des „De sinibus, chordis et arcubus⁵“ in der Übersetzung des Petrus de Alexandria im Codex Vindobonensis Palatinus analysiert hat. Die Beschreibung des dritten Kapitels verrät bereits die grundsätzliche Funktion der Dunkelkammer [17]:

„Das dritte Kapitel entwickelt ein Verfahren, nach dem man die Größenverhältnisse ... von Sonne und Mond zu dem des Kreises auffinden kann, welchen sie außerhalb ihres Deferent zur Beobachtungszeit beschreiben, und zwar aus der Größe des Bildes, das sie nach ihrem Durchtritt durch die Fenster eines Hauses entwerfen.“

Die epizyklischen Hypothese – Epizykel und Deferent

Gemäß der Theorie des Ptolemäus sollten sich die Planeten auf Kreisbahnen um die Erde bewegen. Genauere astronomische Beobachtungen wiesen aber eine deutliche Abweichung von dieser Idealvorstellung auf. So bediente sich Ptolemäus im „Amalgest“ [18] der epizyklischen Hypothese zweier gleichzeitiger Kreisbewegungen, um eine Planetenumlaufbahn um die Erde zu beschreiben. Der Planet rotiert um eine kleine Kreisbahn (Epizykel), deren Mittelpunkt sich auf einer größeren Kreisbahn (Deferent) bewegt. Kopernikus rückte in seinem revolutionären Werk „De revolutionibus orbium coelestium“ [19], zwar die Sonne in den Mittelpunkt des Systems, nutzte aber nach wie vor die epizyklische Hypothese, um den Lauf der Gestirne zu beschreiben. Bei entgegengesetztem Drehsinn auf Epizykel und Deferent kann so mit einem Aufwand auch eine Ellipse dargestellt werden. Erst mit Keplers 1609 in der „Astronomia Nova“ [20, 21] vorgestellten Idee einer elliptischen Planetenbahnen konnte auf die Epizykeltheorie verzichtet werden.

Im Folgenden entwickelt Gershon eine ausführliche Beschreibung der Dunkelkammer, von der hier nur der „Haupsatz“ wiedergegeben ist: (aus [17], S. 226–227)

„Wenn Sonnen-, Mond- oder andern Lichtquellen entstammende Strahlen durch irgend ein Fenster oder Loch einfallen und auf einen hinter genannter Öffnung befindlichen Gegenstand treffen so ist das Bild derselben allerseits entsprechend dem Winkel, welchen der Halbmesser des leuchtenden Körpers an der Eintrittsstelle bildet, breiter als die Lochöffnung.“

Etwas später im Text folgen zwei erwähnenswerte Beobachtungen:

„...und je kleiner die Öffnung im Fenster ist, umso genauer wird das Ergebnis der Messung werden“

„Weiter folgt daraus, dass, wenn die Verfinsternung sich an der einen Seite des leuchtenden Körpers zeigt, die Ausbuchung sich auf der entgegengesetzten Seite des Bildes auf dem Schirme befindet. Ist doch aus dem vorhergehenden Beweise klar, dass die untere Hälfte des Gestirnes dem oberen Teile des Bildes Licht zusendet, und immer die entgegengesetzte Gestirnseite die entgegengesetzte Stelle des Bildes entstehen lässt.“

⁵Curtze, ein ausgewiesener Kenner der Schriften des Gershon, hatte einige Jahre zuvor in einer Abhandlung über Gershons Trigonometrie auf die Camera obscura hingewiesen [16].

Mit dem „Hauptsatz der Dunkelkammer“, seiner präzisen Beschreibung des Einflusses des Lochdurchmessers auf die Bildqualität und der Schilderung seiten- und höhenvertauschten Abbildung beweist Gershon, dass er das Grundprinzip der optischen Abbildung verstanden hatte und anwenden konnte (auch wenn er die Bezeichnung Camera obscura nicht verwendet hat). Da aus dem Text des Jahres 1342 bekannt ist, dass Gershon seine Erkenntnisse auch mittels der Beobachtung von Mond- und Sonnenfinsternissen gewann, könnte er zu seinen Lebzeiten (1288–1344) durchaus die Mondfinsternis vom 3. Oktober 1335 und die Sonnenfinsternis vom 3. März 1337 beobachtet haben.

Es bietet sich förmlich an, diese Art der Abbildung auch für Zwecke der zeichnerischen Darstellung zu verwenden. Die Nutzung der Perspektive in der Malerei verlangt aber nach einer Kamera im heutigen Sinne, also einem Gerät zur Projektion der dreidimensionalen Umwelt auf eine Fläche. Brunelleschi verstand und nutzte die Regeln der Perspektive zur grafischen Darstellung seiner architektonischen Entwürfe. Interessanterweise entwickelte er aber auch das bereits beschriebene Gerät, mit dem die gemalte Perspektive über eine Abbildung an einem Spiegel mit dem Original verglichen werden konnte [22]⁶. Durch die Abbildung über den Spiegel konnte das Bild nun in der doppelten Entfernung zum Spiegel virtuell schwebend im Raum wahrgenommen werden.

Brunelleschi hatte auf diese Weise keine Camera obscura entwickelt, aber ein erstaunliches Gerät entwickelt, mit dem man die gezeichnete Perspektive mit der realen Ansicht durch Überblendung vergleichen konnte. Ganz sicher eine hilfreiche Apparatur für den Baumeister Brunelleschi. Damit hatte er eine Möglichkeit gefunden, die perspektivische Richtigkeit seiner verkleinerten Projektionen der großen Bauwerke eindrucksvoll und zweifelfrei nachzuweisen.

Eine Verkleinerung der Gegenstände findet auch bei der Abbildung im Auge statt. Es verwundert nicht, dass Leonardo da Vinci, der sich intensiv mit der Perspektive, der Darstellung und der Anatomie des Menschen beschäftigt hatte, auch die Funktionsweise des Sehens ergründen wollte.

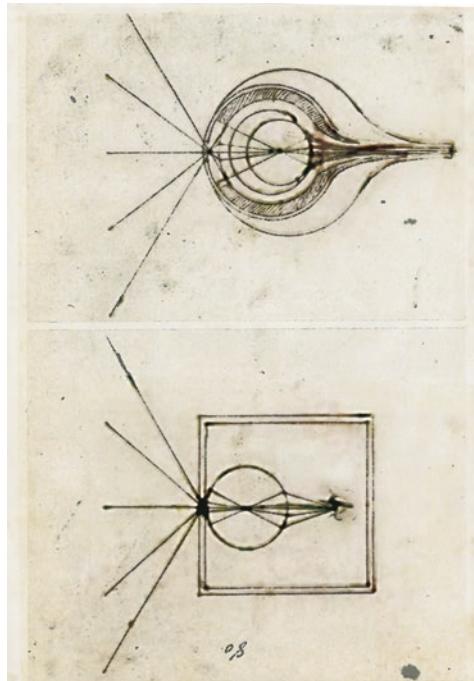
Ein Blick in Codex Atlanticus [24] verrät seine Sicht auf das Auge. In einer Zeichnung vergleicht er den Strahlenverlauf im Auge mit der Abbildung in einer Camera obscura, bei der die Abbildung auf die Rückwand einer Kugel erfolgt und dort vom Betrachter gesehen wird (Abb. 3.4).

In seinem Aufsatz über die Dunkelkammer übersetzt Curtze einen Abschnitt aus da Vincis Pariser Manuskript D [25] auf Blatt 8 [17] wie folgt:

„Sobald durch irgend eine kleine runde Öffnung die Abbilder der beleuchteten Gegenstände in ein sehr dunkles Zimmer eintreten, und man dann diese Abbilder innerhalb dieses Zimmers auf einem weißen Blatt Papier auffangt, das in die Nähe der Öffnung gebracht ist, so wird man alle vorgenannten Gegenstände auf dem Blatte erblicken mit ihrer wirklichen Gestalt und ihren Farben, aber sie werden kleiner und umgekehrt sein...“

⁶Ein stereoskopischer Effekt, wie von Scott behauptet ([23], S. 9) wird sich allerdings einäugig kaum eingestellt haben.

Abb. 3.4 Auge und Camera obscura, Leonardo da Vinci (1478–1519), aus dem Codex Atlanticus [24], Folio 921r,



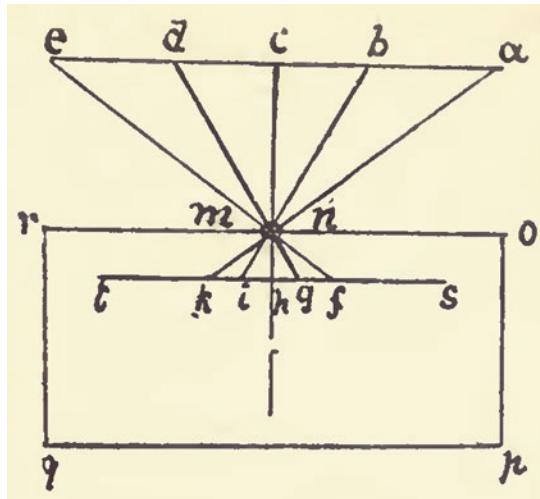
Da Vincis untersucht im Manuskript D die optische Funktion des Auges recht intensiv und zeichnet dazu einige einfache Aufbauten zur Simulation der Abbildung, von denen die oben beschriebene einer Camera obscura am nächsten kommt. Dass da Vinci diese oder eine andere Lochkamera gebaut und für seine Experimente benutzt hat, ist wahrscheinlich, wenn man sich die Beschreibung dazu etwas genauer betrachtet. Da Vinci schlägt zur Abdeckung der Fensteröffnung nicht nur eine Metallplatte mit einem Loch vor (vermutlich um eine möglichst stabile und kleine Öffnung für eine bessere Abbildung zu erhalten), sondern er schlägt die Projektion auf ein dünnes Papier vor, welches von hinten betrachtet wird [26]⁷. Man darf also annehmen, dass da Vinci mit seinen Apparaten experimentiert und deren Unzulänglichkeiten verbessert hatte. Eine kleine Skizze (Abb. 3.5) erklärt die Funktion von da Vincis Dunkelkammer. Lassen wir uns den Aufbau der „Abitatione Oscura“⁸ vom Meister selbst erklären (nach [27], S. 45):

„Es sei **a b c d e** das von der Sonne beleuchtete Objekt und **o r** die Vorderseite der dunklen Kammer, in der sich das genannte Loch bei **n m** befindet. **s t** sei das Blatt Papier, das die Strahlen der Bilder dieser Gegenstände auf den Kopf stellt, weil die Strahlen gerade sind, **a** auf der rechten Hand wird **k** auf der linken Seite, und **e** auf der linken Seite wird **f** auf der rechten Seite; und das gleiche findet innerhalb der Pupille statt.“

⁷Aus der Beschreibung von Folio 8 (recto).

⁸Italienische Originalbezeichnung von da Vinci, zu dt. etwa „dunkle Wohnung“.

Abb. 3.5 „Ein Experiment, welches zeigt, wie die Objekte ihre Bilder übertragen...“, Leonardo da Vinci (1508) [25] Foglio 8 recto, Reproduktion Jean Paul Richter (1883) [27], S. 45



Überdies finden sich weitere Hinweise auf eine Lochkamera sowie einfache Beschreibungen in den verschiedenen, da Vinci zugeschriebenen Werken⁹ (s. a. [27–30]). Das Wissen um diese einfache Form der Abbildung scheint aber erst in den Jahren nach da Vincis Tod bekannt und allgemeiner Wissensstand geworden zu sein.

Ein Nachweis für die praktische Nutzung einer Camera obscura wird dann von Gemma Frisius überliefert, der in seiner Schrift „De radio astronomico & geometrico“ [31] von der Sonnenfinsternis des Jahres 1544 berichtet und ohne weiteres eine Zeichnung seiner Beobachtungsvorrichtung befügt (Abb. 3.6).

Man könnte interpretieren, dass die Beiläufigkeit der Erwähnung dieses Apparates auf einen hohen Bekanntheitsgrad der Camera obscura zu dieser Zeit hinweist. Vielleicht war aber die Konstruktion einer einfachen Lochkamera für den erfahrenen Gerätebauer Frisius naheliegend und nicht der Rede wert.

Giovanni della Porta widmete sich in Neapel der Erforschung der Natur. In dem zwanzigbändigem Werk „Magia naturalis“ [32] findet sich im siebzehnten Buch „in dem die Brennspiegel und ihre wunderbaren Erscheinungen vorgelegt werden“¹⁰ ein Kapitel über die Wirkungen der gläsernen Linse¹¹. Eine erstaunliche Anwendung einer solchen Linse wird im Kapitel über die Nutzung konkaver Gläser¹² beschrieben. Die Einleitung deutet bereits auf eine Kamera hin: „Auf diese Weise werden alle Dinge in der Dunkelheit mit ihren Farben von der Sonne außerhalb dargestellt.“¹³ Im weiteren Text wird

⁹Z. B. in den verschiedenen Ausgaben des Codex Atlanticus oder im Codex Leicester.

¹⁰In quo ustoria specula, & mirabiles eorum visiones proponuntur.

¹¹De crystallinae lentis effectibus.

¹²Alia speculi concavi operationes.

¹³Veluti ut omnia in tenebris, qua foris a sole illustrantur cum suis coloribus (aus [32], S. 545).

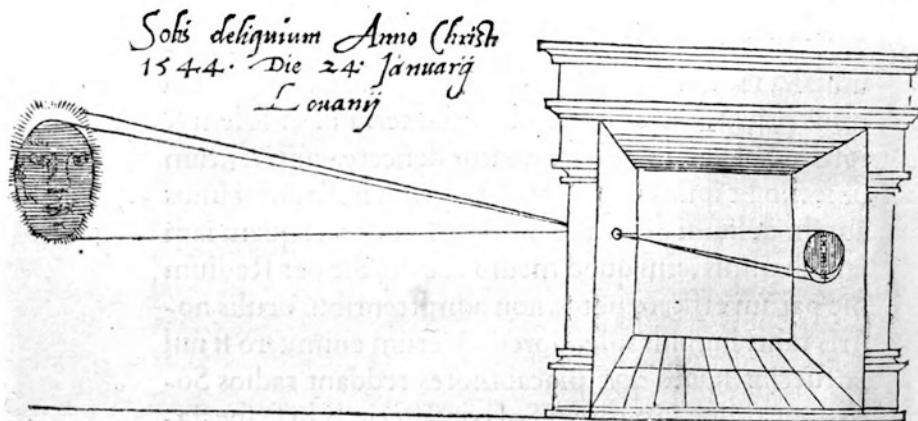


Abb. 3.6 Solis deliquium, Rainer Gemma Frisius (1545) aus [31], S. 31, 2. Blatt

klar, dass es sich nicht um eine Linse, sondern einen Spiegel handelt, der eine konkave Oberfläche aufweist und damit als Brennspiegel bzw. wie eine Sammellinse wirkt: „Du musst alle Kammerfenster schließen, und es wird gut sein, alle Löcher nebenher zu sperren, jedes Licht, das einfällt, wird alles verderben. Mach nur ein Loch, das ist eine Hand breit und lang; darüber ist ein kleiner Blei- oder Messingtisch, ein Spiegel, so dick wie ein Papier;...“¹⁴. Auf einer weißen Fläche aus (Papier oder Stoff) gegenüber dem Loch bilden sich dann die außerhalb der Kammer befindlichen Gegenstände seiten- und höhenvertauscht ab¹⁵. Wir haben hier – im wahrsten Wortsinn- nicht nur eine dunkle Kammer, eine „Camera obscura“, sondern tatsächlich auch eine Kamera mit Objektiv und Projektionsfläche im heutigen Sinn. Leider liefert della Porta zu dieser Beobachtung keine Zeichnung, so dass noch Raum für Spekulationen bleibt.

In seinem Buch „Ad Vitellionem Paralipomena“ beschreibt Johannes Kepler 1604 einen Besuch im „Finstergemach“ [34] der Dresdner Kunstkammer (aus [35], S. 182).

„Eine Scheibe, dicker in der Mitte, oder eine Augenlinse, ..., stand am Eingang einer geschlossenen Kammer gegen ein kleines Fenster, das als einziges geöffnet war, Als der Blick durch die dunkle Leere reiste, traf er zufällig auch auf den Platz des Bildes...“

Kepler war mit den Vorarbeiten von Euklid, Alhazen, Witelo, Porta und natürlich denen seines Mentors Brahe durchaus vertraut. Da sich Kepler in dem Kapitel „Über die Lichtfiguren“ sehr intensiv mit der Ausbreitung des Lichtes auseinandersetzte, erkannte er den Zusammenhang zwischen dem Objekt und seiner Abbildung (aus [36], S. 19):

¹⁴Aus der englischen Ausgabe von 1658 [33], S. 363, eigene Übersetzung.

¹⁵„...und du wirst alles auch ohne Sonne sehen, und diejenigen, die auf der Straße laufen, erscheinen als Antipoden, und was rechts war, ist nun links,... (aus [33], S. 363, eigene Übersetzung).

„Wenn das Fenster ein mathematischer Punkt sein könnte, so würde das Licht auf der gegenüberstehenden Wand die Figur der beleuchteten Fläche vollkommen wiedergeben, aber verkehrt, und es würde dasselbe Verhältnis der Durchmesser der leuchtenden Oberfläche zu denen der beleuchteten Wand bestehen, wie zwischen den beiderseitigen Abständen vom Fensterpunkt.“

Hiermit ist dann im Wesentlichen die Abbildung an einer Lochkamera beschrieben, deren Funktion Kepler auch gezeichnet hat (Abb. 3.7).

Die Kunst, „in einer geschlossenen Kammer ... alles zur Darstellung zu bringen, was sich außerhalb der Kammer ... befindet“ ist Kepler von Porta überliefert und ihm in der Beschreibung aus der „Magia naturalis“ bekannt. Kepler untersucht auch den Einfluss des Lochdurchmessers auf die Abbildung. Ein zu kleines Loch liefert eine lichtschwache, aber deutliche Darstellung, ein zu großes Loch dagegen ein rohes und verschwommenes Bild. Keplers Kammer ist zwar auch finster, er verwendet aber den Ausdruck „geschlossen“, also „Camera clausa“ ([35], S. 51). Auch die Bezeichnung „Camera obscura“ wird durch Johannes Kepler geprägt: Sie findet sich im Indexeintrag „Camera obscura res foris representans“ als Hinweis auf die Kunst der „Camera clausa“.

Kepler untersuchte ausführlich die optischen Eigenschaften von Linsen, Spiegeln, Prismen und sogar Linsensystemen [37] und stellte damit die Optik auf eine wissenschaftliche Grundlage. Die Nutzung einer Linse zur Abbildung war nachfolgenden Forschern damit also ebenso bekannt, wie die Lochkamera. Und so wundert es nicht, dass die Kombination beider Systeme im 17. Jahrhundert zur technischen Entwicklung einiger brauchbarer Exemplare der Camera obscura und damit zur Entwicklung der Kamera im heutigen Sinn führte.

Christoph Scheiner beobachtete ab 1610 in Ingolstadt die Sonnenflecken mittels Projektion, Camera obscura und astronomischen Teleskop, einer Erfindung Keplers. Die Veröffentlichung seiner Erkenntnisse unter dem Pseudonym „Apelles latens post tabulam“ [38] führt zum Jahrzehntelangen Streit mit Galileo Galilei über den tatsächlichen Entdecker der Sonnenflecken. Von Bedeutung für das Verständnis des Sehvorganges war sein Werk „Oculus“ [39] über das Auge, in dem er unter anderem auch die Pupillenverengung bei Akkommodation beschreibt und damit die Naheinstellungstrias vorwegnimmt.

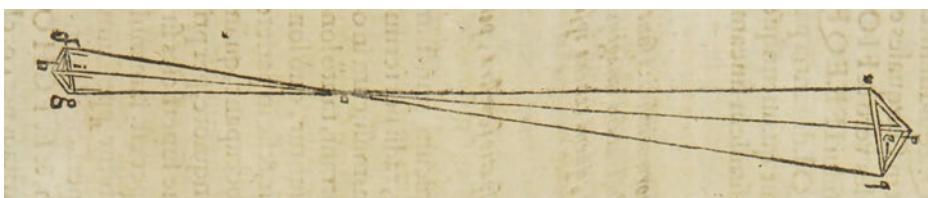


Abb. 3.7 Sinestrum punctum, Johannes Kepler (1604) aus [35], S. 43

In seiner „Ars Magna“ beschäftigte sich Athanasius Kircher ganz besonders auch mit der praktischen Anwendung der Optik zur Darstellung von Bildern. Der einfache Aufbau der Dunkelkammer hatte Kircher zu einigen interessanten Verwendungen angeregt. Dabei ist bedeutsam, dass Kircher nicht nur selbstleuchtende Objekte abbildet, sondern durchaus auch vorab erzeugte Zeichnungen und Gemälde reproduziert (Abb. 3.8).

Ein herausragender Schüler von Kircher war Kaspar Schott, der sich parallel zu Kircher mit mathematischen und perspektivischen Fragestellungen beschäftigte und intensiv die Möglichkeiten der Abbildung untersuchte. Von Schott stammt ein Entwurf einer mehrseitigen Camera obscura, in deren Inneren sich ein weiterer Raum aus Projektionswänden befand. Durch die Öffnungen in der äußeren Kammer wurden so Bilder auf die inneren, durchscheinenden, Leinwände projiziert. Ein Zeichner, der sich in der Mitte des Innenraums platzierte, konnte so eine 360°-Sicht der Szene beobachten und aufzeichnen (Abb. 3.9).

Johann Zahn war ein Schüler Caspar Schotts und wie sein Lehrer auch an der optischen Abbildung interessiert. Sein Vorschlag einer Kamera mit Spiegelablenkung und Objektiv aus dem Jahre 1685 ist hochaktuell. Die Zeichnung (Abb. 3.10) zeigt den Strahlengang in einem solchen System. Ein Objekt (hier der Pfeil **AB**) wird über eine Linse **CD** und einen Planspiegel **EF** auf eine durchscheinende Fläche an der Position

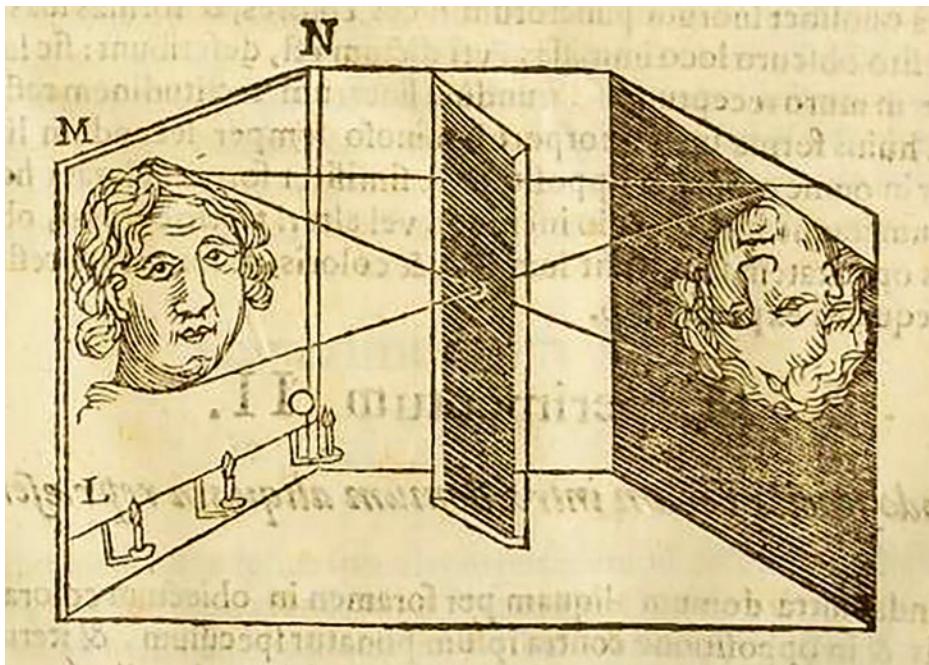


Abb. 3.8 Abbildung eines Bildes mittels Camera obscura, Athanasius Kircher (1646) [40], S. 121

Abb. 3.9 360° Camera obscura, Caspar Schott (1657) aus [41], S. 194, Fig. II

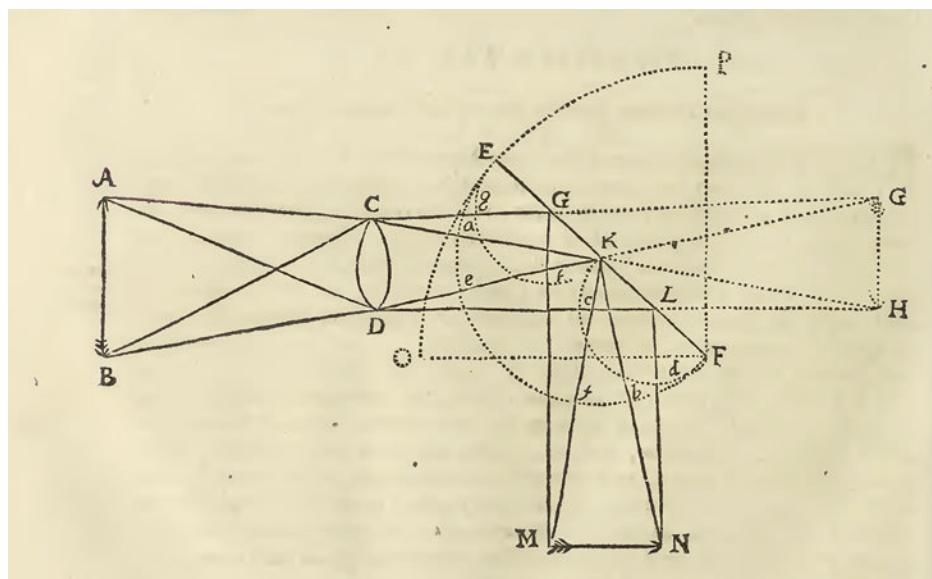
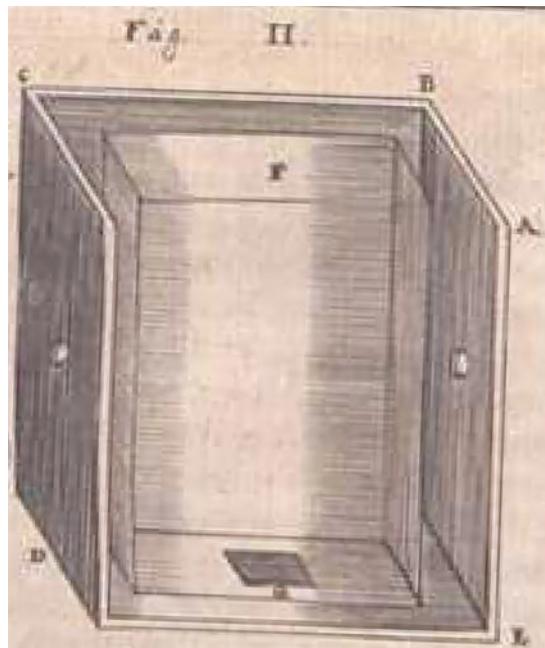


Abb. 3.10 Abbildung über einen Spiegel, Johann Zahn (1685) aus [42], S. 178

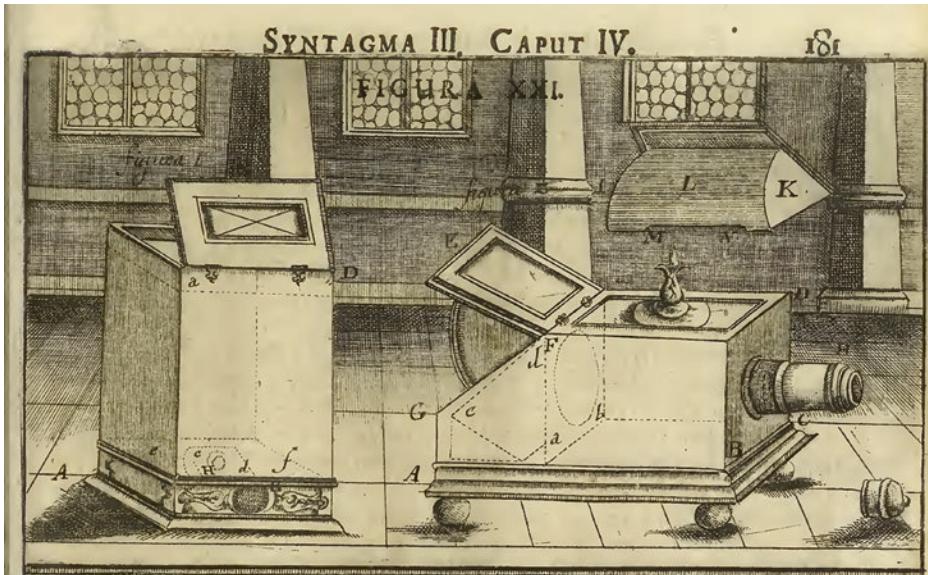


Abb. 3.11 Tragbare Camera obscura, Johann Zahn (1685) aus [42], S. 181

MN abgebildet. Der Spiegel lässt sich um den Punkt F drehen. In Position OF wäre er aus dem Strahlengang entfernt und das Bild erschien an der Position GH.

Damit ist der optische Aufbau einer Spiegelreflexkamera recht gut beschrieben. Im Gegensatz zu seinen Vorgängern ging Zahn aber noch einen Schritt weiter. Er entwarf eine praktikable und tatsächlich mobile Kamera (Abb. 3.11).

Auf der, in geeignete Position geneigten, Mattscheibe der Kamera erschienen die Bilder der Umwelt und konnten so vom Beobachter leicht auf einem durchscheinenden Papier nachgezeichnet werden. Diese Art der Kamera mit Objektiv, Spiegel und Mattscheibe wurde lange Zeit in ähnlicher Form verwendet.

Nur wenige Jahre später (1694) hielt Robert Hooke¹⁶ einen Vortrag vor der Royal Society über sein „Instrument zu Anfertigen von Skizzen oder Bildern von allen Dingen“¹⁷ [45]. Das Ding, das er dabei benutzt ist durchaus bemerkenswert und bedarf zwingend der Abbildung (Abb. 3.12).

¹⁶Hooke war seinen Zeitgenossen durch sein Werk „Micrographia“ [43] bekannt. Die darin abgebildeten Zeichnungen basierten auf den Beobachtungen mit seinem Auflicht-Mikroskop und erlaubten einen Blick in die unbekannte mikroskopische Welt. Der Name Hooke wird heute aber eher mit dem Hookeschen Gesetz über die Federdehnung „Ut tensio, sic vis“ (wie die Dehnung, so die Kraft) [44] in Verbindung gebracht.

¹⁷„An Instrument of Use to take the Draught, or Picture of any Thing.“ [45], S. 292.

Abb. 3.12 Picture-Box,
Robert Hooke (1726) aus [45],
S. 295



Der Zeichner trägt die gesamte Camera obscura auf den Schultern und befindet sich mit Kopf und Händen im Inneren des Gerätes. Da die Picture-Box am Hinterkopf des Künstlers befestigt ist, kann man hier sicherlich von einem Head-Mounted-Display sprechen.

Noch im 19. Jhd. werden ganz offensichtlich die -nun auch als „Camera clara“ (helle Kammer) bezeichnete- Camera obscura und auch die kleinere Camera lucida benutzt. Einer der bekanntesten Nutzer war Johann Wolfgang von Goethe, der dieses Gerät für seine wissenschaftlichen Studien verwendete [46]. So schreibt Goethe an Frau Charlotte Schiller am 18. April 1788 [47]

„Gestern habe ich meine camera obscura wieder zurechte gestellt und bei Betrachtung des Apparats meinen Gang in diesem Theile der physikalischen Wissenschaft bezeichnet. Man sieht recht die Umwege die man gemacht hat, wenn man die Mittel und Werkzeuge deren man sich zu seinem Zweck bediente, noch alle vor sich sieht.“

Im Goethe-Nationalmuseum in Weimar wird Goethes originale Camera obscura aufbewahrt. (Abb. 3.13). Bei diesem Modell fallen vor allem zwei Dinge ins Auge: Das verschiebbare Objektiv zur Fokussierung und die Klappe zum Schutz der Mattscheibe während des Transportes.



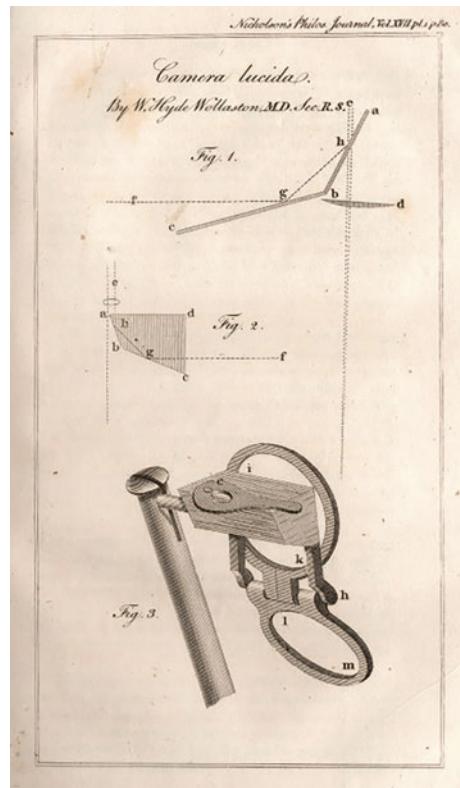
Abb. 3.13 Tragbare Camera obscura aus Goethes Privatbesitz, Goethe-Nationalmuseum, Hajothu (2015), Wikimedia Commons

Freilich war diese Bauweise nicht die einzige, die für Aufzeichnungen gebraucht wurde. Die eben erwähnte Camera lucida¹⁸ wurde 1807 von dem Londoner Arzt und Chemiker William Wollaston vorgeschlagen. Wollaston war ein eifriger Forscher¹⁹, der sich auch mit dem Skizzieren von Landschaften beschäftigte. Eine herkömmliche Camera obscura schien ihm zum Zeichnen schon deshalb nicht geeignet, weil durch die einmalige Reflexion am Spiegel die Dinge seitenverkehrt erscheinen. Es liegt auf der Hand, dass zu einer weiteren Umkehr des Bildes eine zusätzliche Reflexion eingesetzt werden kann. Wollaston verwendet ein vierseitiges Prisma (Abb. 3.14, Fig. 2), mit den Eckpunkten **abcd** um den Blick auf das Zeichenpapier doppelt zu spiegeln. In der Abbildung ist dieser Sehstrahl durch die Strecke **ehgf** dargestellt. Gleichzeitig (oder mit schweifendem Blick) sieht der Zeichner über das Prisma hinweg auf die zu skizzierende Szene (hier der Sehstrahl **a**), so dass eine Überlagerung des Abbildes auf dem Zeichenpapier mit der Realität entsteht [50].

¹⁸Von lat. *lucidus*: deutlich, klar.

¹⁹Wollaston ist wohl eher für die Entdeckung und Beschreibung der Elemente Rhodium und Palladium [48] bekannt und dem Optiker durch sein Refraktometer [49] und -ganz besonders- durch das doppelbrechende Wollaston-Prisma, mit dem unpolarisiertes Licht in seine polarisierten Anteile (den ordentlichen und außerordentlichen Strahl) aufgespalten wird, vertraut.

Abb. 3.14 Camera lucida,
William Hyde Wollaston
(1807) aus [50]



3.2 Laterna magica

Zauberlaterne und Schreckenslampe

Die Umkehrung des Lichtweges macht aus einer der Dunkelkammer eine Zauberlampe. Die Schwierigkeit liegt eigentlich nur darin begründet, dass das zu projizierende Bild eine sehr große Helligkeit aufweisen muss, um nach einer Lochblende noch mit bloßem Auge gesehen zu werden. Es ist also nicht verwunderlich, dass die Projektionslaternen erst dann ins Rampenlicht traten, als auch die Fertigung von Linsen und Spiegeln eine zur Lichtbündelung ausreichende Qualität erreichte und helle Lampen hergestellt werden konnten. Ebenso wenig überraschend ist die Tatsache, dass diejenigen Forscher, die sich mit dem Studium der Optik und der Camera obscura beschäftigten, auch zu den Vätern der Laterna magica zählten.

Eine frühe Darstellung der Laterna magica (ca. 1420) findet sich in einem Manuscript von Johannes de Fontana in seiner Sammlung Bellicorum instrumentorum liber cum figuris [51]. Auf der letzten Seite ist eine Dame mit einer Laterne abgebildet (Abb. 3.15).



Abb. 3.15 Bellicorum instrumentorum liber cum figuris, Nächtliche Erscheinung zum Schrecken der Betrachter, Johannes de Fontana (ca. 1420) aus [51], München, Bayerische Staatsbibliothek – Cod. icon. 242, Folio 70r

Im Original rechts daneben wird die Projektion der kleinen Zeichnung aus dem Inneren der Laterne gezeigt und stellt wohl einen Bewohner der Hölle dar. Der Titel der Zeichnung lautet daher „Nächtliche Erscheinung zum Schrecken der Betrachter“ (*Apparentia nocturna ad terrorem videntium*). Dazu steht im verschlüsselten Text: „Du kennst die Methode mit der Laterne und hast die von mir selbst nach eigener Idee gefertigte [Laterne, Anm. d. Verf.] mit eigenen Augen gesehen.“²⁰

„Die Laterne ist in Abb. 3.15 auf der linken Seite des Bildes noch einmal vergrößert in Graustufen dargestellt. Gut zu sehen ist in der Vergrößerung, dass Johannes de Fontana das projizierte Motiv im Inneren der Laterne ganz korrekt noch einmal verkleinert dargestellt hat. Das könnte darauf hinweisen, dass Fontana über praktische Erfahrung im Umgang mit der Laterne verfügte und diese tatsächlich selbst angefertigt hatte.“

²⁰Lat.: „Habes modum cum lanterna, quam propriis oculis vidisti exMEA manu fabricatam et proprio ingenio.“, Entschlüsselung und Übersetzung von Horst Kranz [52].

Der „Uomo universale“²¹ Alberti beschrieb 1436 in seinem Werk „Della pittura“ [54] nicht nur die Verwendung der Perspektive. Wie uns Tiraboschi in seinem Monumentalwerk „Storia della Letteratura Italiana“ [55] mitteilt, verwendete er zur Darstellung seiner Perspektivbilder möglicherweise etwas ähnliches wie einen Guckkasten („Camera ottica“, also eine optische Kammer). Dabei sah man durch ein kleines Loch in diesem Kasten auf die gemalte Abbildung einer Szene, die in der Wahrnehmung sehr realistisch gewirkt haben musste (aus [55], S. 368, eigene Übersetzung):

„Er schrieb (Alberti) einige Bücher über die Malkunst, und mit dieser Kunst kreierte er unerhörte Werke, die unglaublich waren für diejenigen, die sie sahen. Er hatte sie in eine kleine Schachtel eingeschlossen und sie durch ein kleines Loch gezeigt. Du hättest dort hohe Berge gesehen, weite Provinzen rund um das Meer und noch mehr aus fernen Ländern, die man mit eigenen Augen kaum sehen kann. Diese Dinge wurden von ihm gezeigt, und sie waren so, dass Einfache und Gelehrte glaubten, reale Dinge zu sehen, keine gemalten Bilder.“

Wahrscheinlich war Albertis optische Kammer also bereits eine Vorrichtung zur Bildwiedergabe, eine Art früher Diabetrachter, in dem das Loch die Funktion der Linse übernahm.

Eine Projektion des Bildes war mit Albertis Vorrichtung allerdings noch nicht möglich.

Natürlich wird auch Leonardo da Vinci eine Laterna magica zugeschrieben. In der Tat ist im Codex Atlantico [24] auch eine Zeichnung eines Kastens mit einer Linse enthalten, von der Licht auszugehen scheint (Abb. 3.16).

Eine helle Lampe ist gewiss eine wichtige Voraussetzung für einen Projektor. In Schwenters „Mathematischen und Philosophischen Erquickstunden“ von 1636 [56] kann sich der Leser an zahlreichen mathematischen, geometrischen und physikalischen Aufgaben erfreuen. Im sechsten Teil werden einige Aufgaben und Fragen zur „Catropticam oder Spiegelkunst“ gestellt. Für die Lösung der 31. Aufgabe wird eine helle Laterne benötigt:

„Jetzt will ich noch eine treffliche Erfindung entdecken, wie man nemlich durch einen holen Spiegel und Liecht eine Schrifft in der Ferne lesen soll: Erstlich muß man in dem Spiegel finden **punctum unctionis, das ist den Brenpunkt, ..., und dazu halten ein angezündtes Liecht: So springet das Liecht weit durch die Parallel Linien zurück und macht so einen hellen Schein.**“

²¹Ital.: der „allseitige Mensch“, Idealbild des Menschen aus der Zeit der Renaissance. Alberti wird als Universalmensch, der in allen Künsten und Wissenschaften bewandert war und diese, gepaart mit außergewöhnlichem physischem Geschick meisterhaft zur Geltung bringen konnte, gerühmt. Das berühmteste Universalgenie ist aber sicherlich Leonardo da Vinci (nach [53]).

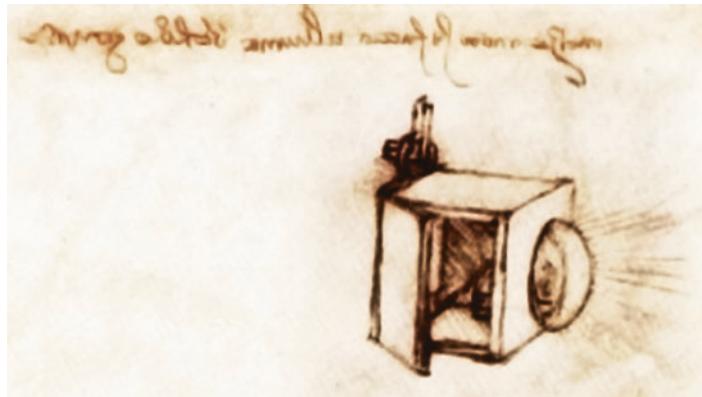
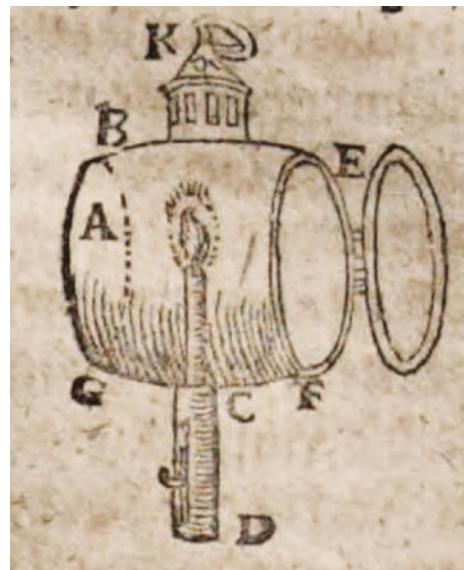


Abb. 3.16 Laterne mit Linse, Leonardo da Vinci (zw. 1487 u. 1519) aus [24] Folio 34 r

Mit der Kerze im Brennpunkt des Hohlspiegels hatte Schwenter eine verbesserte Lichtquelle geschaffen, die sich nun auch für den Beleuchtungsstrahlengang eines Projektors eignet (Abb. 3.17).

In den reich bebilderten Abhandlungen des Bettini von 1642 [57] finden sich neben den Zeichnungen verschiedener Projektionen auch die Darstellungen unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte. Bettini kennt den Beleuchtungsstrahlengang mit Reflektor und

Abb. 3.17 Handlaterne,
Daniel Schwenter (1636) aus
[56], S. 301



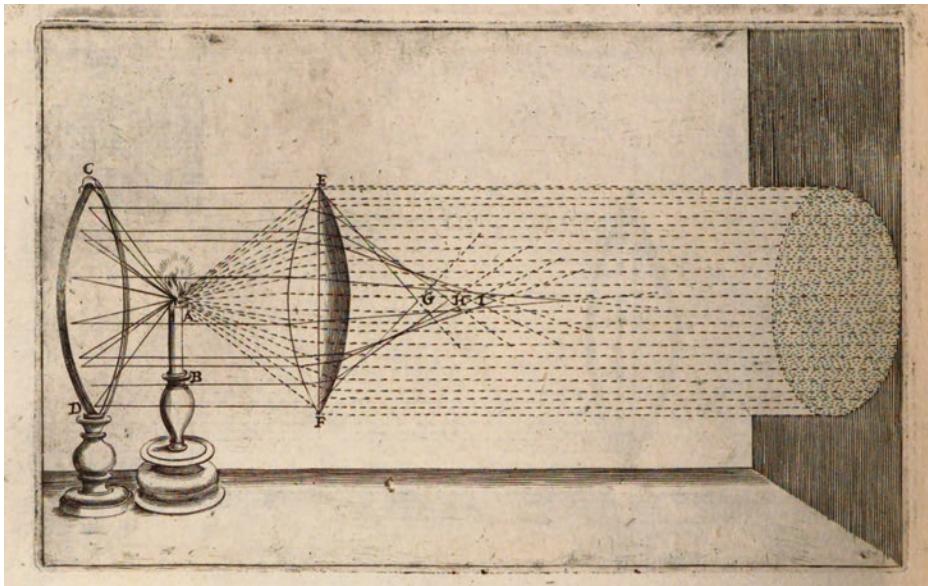


Abb. 3.18 Beleuchtungsstrahlengang, Mario Bettini (1642) aus [57], Dioptrica S. 26

Kondensorlinse (Abb. 3.18) und weiß um die Abbildungsprobleme bei sphärischen Linsen, die hier in der Abbildung durch die unterschiedlichen Brennpunkte dargestellt sind.

Die von ihm vorgeschlagene asphärische, hyperbolische Krümmung führt beinahe zu einer idealen Linse und verbessert die Abbildung entscheidend. Im 6. Teil (Dioptrica) der „*Apiaria Universae Philosophiae Mathematicae*“ wird diese Linse dann sogar zur Projektion eines Bildes auf eine Wand eingesetzt (Abb. 3.19).

Bettini nutzt zudem eine Linse zur Bildumkehr in der Camera obscura und illustriert die Auswirkungen unterschiedlicher Bildweiten (Abb. 3.20).

Diese Idee wird im zweiten Teil der „*Erquickstunden*“, der nach dem Tode Schwenters von Harsdörffer zusammengetragen wurde [58], unter Bezugnahme auf Bettini aufgegriffen. In der 15. Aufgabe des 5. Teils (von der Sehkunst) ist eine schöne Zeichnung abgebildet, die ebenfalls einen Abbildungsstrahlengang mit Bildumkehr beinhaltet und als Mischung aus Camera obscura und Laterna magica dargestellt wird (Abb. 3.17 und 3.21).

Damit sind alle Teile eines Projektors bekannt: Spiegel, Beleuchtungs- und Abbildungslinse. Die Strahlengänge zur Abbildung wurden ausreichend erläutert und die Vorgänge bei der Projektion eines Objektes oder Bildes nachvollziehbar dargestellt. Jetzt fehlt nur noch derjenige, der aus den umfangreichen Vorarbeiten eine Lösung zusammensetzt. Und dieser Wissenschaftler scheint Athanasius Kircher zu sein.

Der gelehrte Jesuit Kircher, Dozent an der päpstlichen Universität „*Collegio Romano*“ in Rom, beschäftigte sich in seinem optischen Lehrbuch „*Die große Kunst von*

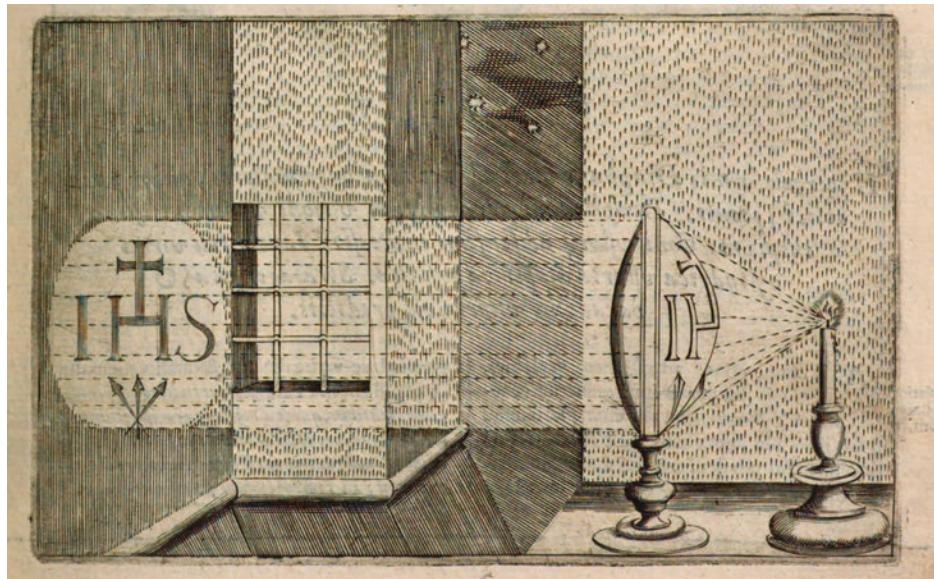


Abb. 3.19 Projektion mit asphärischer Linse, Mario Bettini (1642) aus [57], Dioptrica S. 27

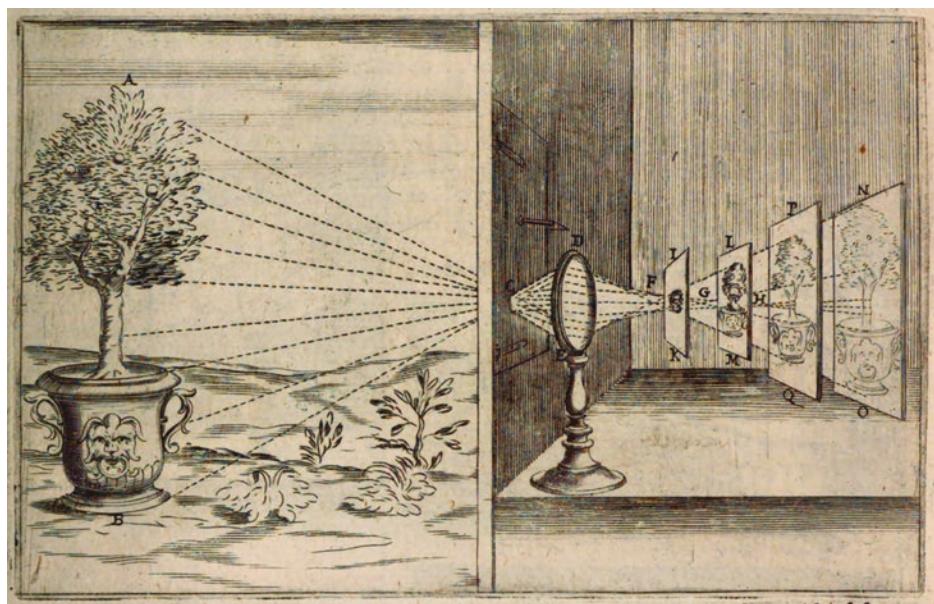


Abb. 3.20 Camera obscura als Laterna magica, Mario Bettini (1642) aus [57], Dioptrica S. 27

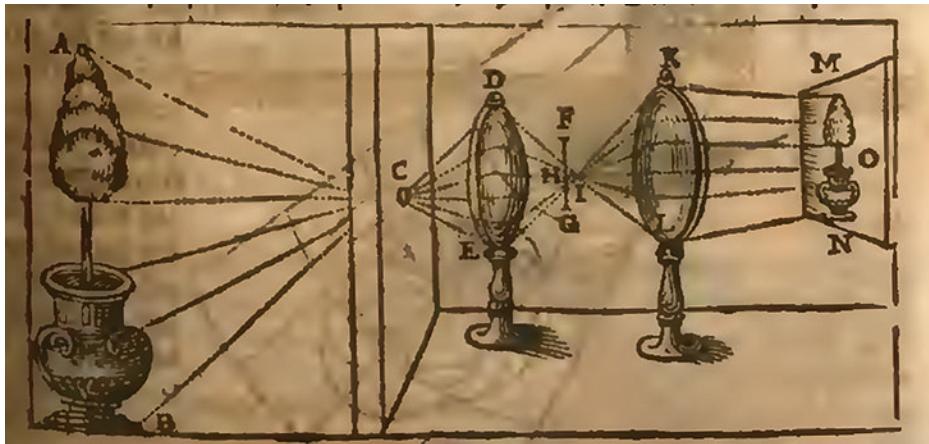


Abb. 3.21 Camera obscura als Laterna magica, Georg Philipp Harsdörffer (1651) aus [58], S. 209

Licht und Schatten“ (*Ars magna lucis et umbrae*) im Jahre 1646 [59] mit einer Vielzahl von wissenschaftlichen Themen seiner Zeit, aber besonders mit allen Formen der Lichtausbreitung und deren Anwendung. Wie bereits ausgeführt, ist ihm der Aufbau einer Camera obscura geläufig und so ist es naheliegend, dass die umgekehrte Lichtrichtung zu einer Projektion mittels einer „magischen Lampe“ (*Lucerna magica*) führt. Im Buch sind einige Abbildungen zur Bildzeugung in einer Camera obscura mit Sonnenbeleuchtung enthalten, von denen beispielhaft die Darstellung mit Mehrfachbild ausgewählt wurde (Abb. 3.22).

Solche Vorführungen wurden tatsächlich schon als eine Art „Dia-Show“ abgehalten, wie Schott 1671 erzählt. Er berichtet in der *Magia optica* [60] von einer Darbietung des Andreas Tacquet aus Löwen in Flandern, der die Reise des Martin Martini²² nach China mit Kirchers „Spiegelred- und Spiegelschreibkunst“²³ in einer Bildgeschichte wiedergab.

Die Nutzung eines Polygon-Rades für die Bildhalterung brachte durchaus einen Geschwindigkeitsvorteil beim Bildwechsel, mit dessen Hilfe man prinzipiell auch bewegte Szenen hätte darstellen können. Von größerer Bedeutung war aus heutiger Sicht aber die Reflexionlaterne „*Lucerna catoprica*“ (Abb. 3.23). Die Laterne ist durch einen Konkavspiegel **AB**, eine Kerze **F**, einen Rauchabzug **C**, und ein Fenster **D** charakterisiert. Ein Handgriff **E** macht die Lampe hochmobil und praktikabel. Kirchers Lampe weist große Ähnlichkeiten mit Schwenters Handlaterne (Abb. 3.17) auf, wobei sich im Text kein Hinweis auf Schwenter findet.

²²Martino Martini war ein Student Kirchers und bereiste als jesuitischer Missionar [61] und Geograph [62] China.

²³Ebdida, S. 398.

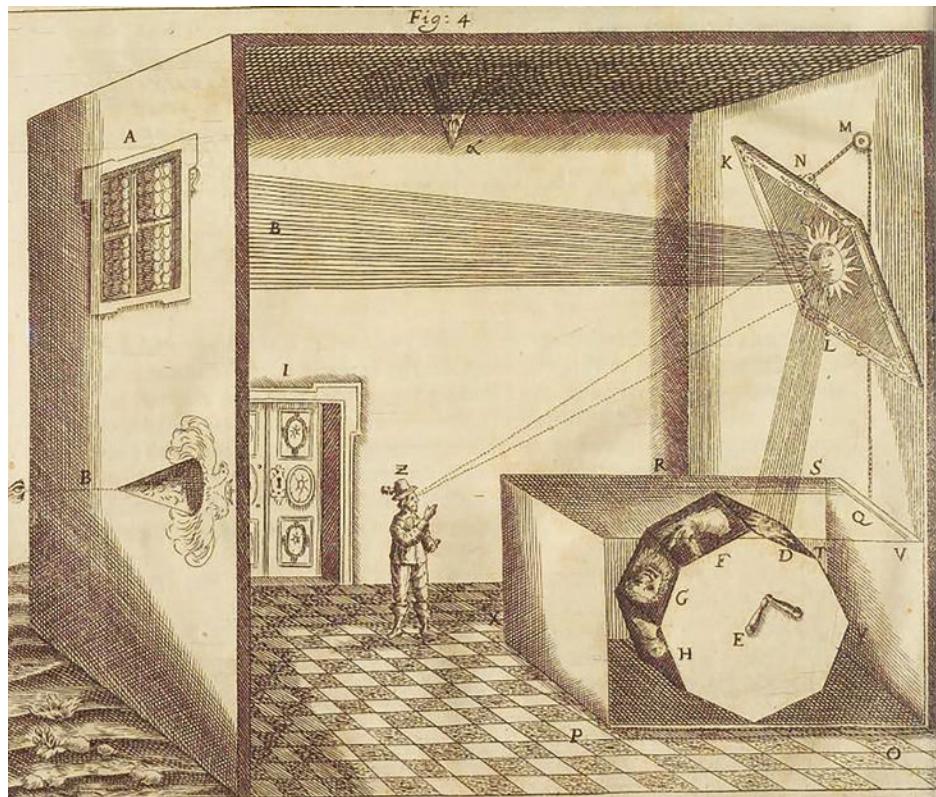
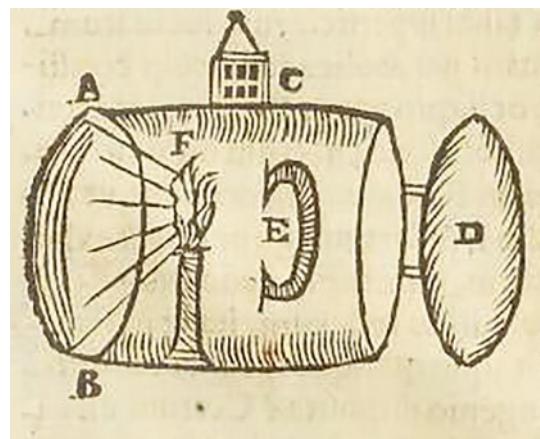


Abb. 3.22 Mehrfachbildprojektion in einer Camera obscura, Athanasius Kircher (1646) aus [59] Folio 901

Abb. 3.23 Lucerna catoprica, Athanasius Kircher (1646) aus [59], S. 887



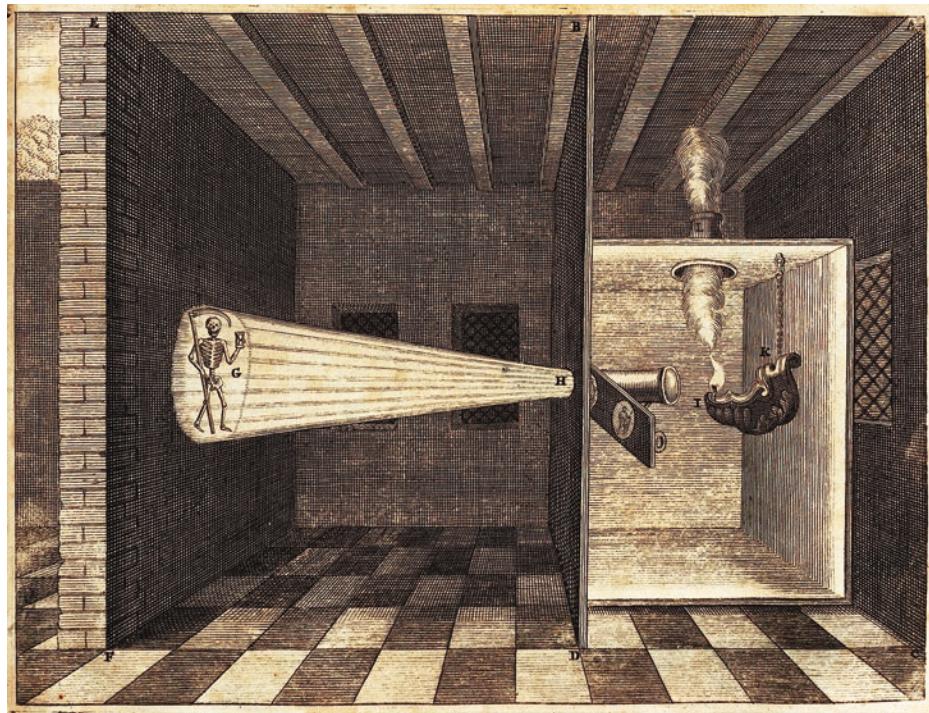


Abb. 3.24 De Lucerna Magicae seu Thaumaturgae constructione, Athanasius Kircher (1671) aus [40], S. 769

In dem Werk „Tractatus opticus“ [63] von 1663 trägt Kohlhans anhand der Schriften anderer Gelehrter den optischen Kenntnisstand zusammen. Kohlans beschreibt darin nicht nur ausführlich die Camera obscura, sondern auch recht blumig und umfangreich die verschiedenen Anwendungen der Spiegelkunst²⁴ Harsdörffers. Darin finden sich solche Aufgaben wie „In die Lufft oder an eine finstere Wand mit Feuer Schreiben“ oder „Bey der Nacht etliche Bilder oder Buchstaben an eine finstere Wand zu schreiben“. Die Laterna magica kennt aber auch Kohlans noch nicht.

Erst in einer späteren Ausgabe der Ars Magna Lucis Et Umbrae aus dem Jahre 1671 [40] ist neben den vorherigen Projektionsvorrichtungen nun auch die Laterna magica namentlich erwähnt und bildlich dargestellt (Abb. 3.24).

Auf dieser Seite wird auch der dänische Mathematiker Thomas Walgenstein als Erfinder der magischen Laterne erwähnt. Walgenstein wird immer wieder

²⁴Harsdörffer hatte unter dem Namen Spiegelkunst (s. z. B. [64]) insbesondere die abbildende Katoptrik (Lehre der Reflexion) Kirchers verstanden und in deutscher Sprache herausgegeben.

Zusammenhang mit den ersten Anwendungen der Laterna magica genannt²⁵ und ihm werden ab 1662 Präsentationen in Europa zugeschrieben [68]. Da von Walgenstein aber keine eigenen Aufzeichnungen bekannt sind, wird die Nachricht über seine Zauberlaterne von Zeugen seiner Präsentationen übermittelt.

Ein aufmerksamer Beobachter einer solchen Veranstaltung war 1665 vermutlich der Mathematiker Claude Dechales. In seinem 1674 erschienen Kursus über die Mathematik [69] wird neben Geometrie und Mathematik auch deren praktische Anwendung in Architektur, Hydraulik, Navigation und Optik behandelt. Die optische Abbildung wird immer wieder auch am Auge erläutert und es findet sich sogar Abhandlungen zum binokularen Sehen „Warum beide Augen die Objekte nicht doppelt sehen“ (S. 380, 415), worin bereits die Disparation aufgezeigt wird. Die parallele Reflexion der Lichtstrahlen einer Kerze im Brennpunkt eines Hohlspiegels wird ebenso skizziert wie dessen Anwendung in einer Laterne (sogar mit einer zusätzlichen Sammellinse zur Lichtbündelung, S. 586). Nach einer Abhandlung der Abbildung durch Linsensysteme wendet sich Dechales der Aufgabe der Projektion an eine Wand zu. Dechales berichtet von der einem dänischen Gelehrten (der vermutlich Walgenstein gewesen sein wird), der ihm auf der Durchreise durch Lyon seine Projektionslampe vorführte. Dechales verwendet nun auch den Namen „Laterna magica“ zur Beschreibung seines Prototypen zur Vergrößerung von Bildern für die Darstellung auf Wänden: „Hier stellen wir die Lyoner dioptrische Maschine unter dem Namen Laterna Magica vor...“²⁶.

Dechales fertigt eine Zeichnung der „Lyoner dioptrischen Maschine“ an, die nun alle Elemente eines Projektors aufweist: Lichtquelle, Reflektor, Abbildungsobjektiv (Abb. 3.25).

Ein weiterer Hinweis für die Existenz einer Zauberlaterne stammt von Juncker, der den Reisebericht „Voyage d'Angleterre, Pais-Bas, Allemagne, & Italie“ des Franzosen Monconys [70] ins Deutsche übersetzte. Auf seiner Reise nach England im Jahre 1663 besucht Monconys den Optiker Reeves²⁷ in London, der Monconys eine einfache optische Laterne vorführte [72].

Auch einer bekannten Persönlichkeit seiner Zeit, dem Physiker Huygens, wird die Erfindung der Laterna magica zugeschrieben. Dafür gilt neben Huygens Zeichnungen eines tanzenden Skelettes, die als Vorlage für eine Projektion mit einer Lampe mit konvexen Gläsern²⁸ vorgesehen war, insbesondere auch seine umfangreiche Korrespondenz mit dem Franzosen Pierre Petit. Dabei kommt die Projektionslaterne immer wieder vor.

²⁵S. a. „The magic of the magic lantern“ [65], „Die Laterna magica der Literatur“ [66], „Wissenschaftliche Anwendungen der Photographie“ [67].

²⁶Im Original „Vidimus hic Lugduni dioptricam machinam, sub nomine Laternae magicae“ ([69], S. 655).

²⁷Richard Reeves, dessen Sohn John auch mit Huygens bekannt war (s. a. [71], S. 45, 271, 279, 314, 445), stellte in der James Street optische Instrumente her.

²⁸„Pour des representations par le moyen de verres convexes à la lampe“ (aus [73], S. 197).

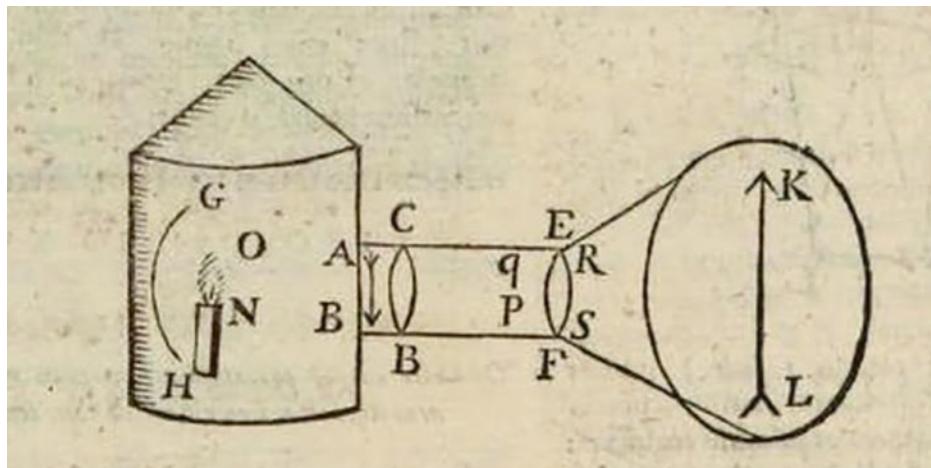


Abb. 3.25 Laterna magica, Claude Dechales (1674) aus [69], S. 666

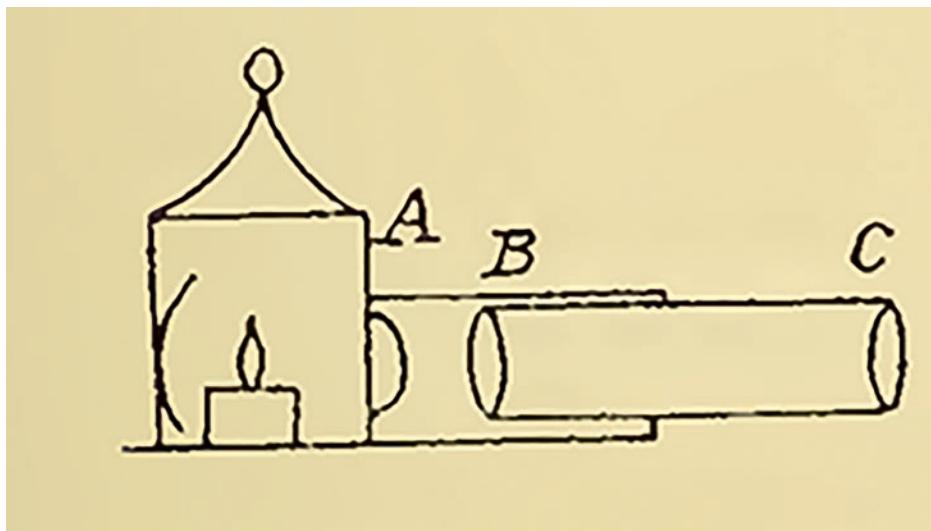


Abb. 3.26 Lanterne de peur, Pierre Petit (1662) aus [74], S. 269

In einem Brief seinem Brief vom 28. November 1662 beschreibt Petit die „Laterne der Angst“ („Lanterne de peur“, [74], S. 269) und fügt auch eine einfache Skizze hinzu (Abb. 3.26).

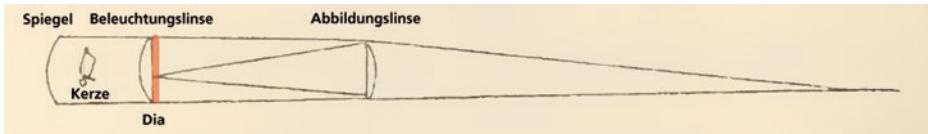


Abb. 3.27 Laterna magica, Christiaan Huygens (1664) aus [77], S. 162

Hintergrundinformation

In einer Beschreibung der Sammlungen in der Königlich Dänischen Kopenhagenschen Kunstkammer schildert Holger Jacobsen 1696 unter anderem auch die „Lucerna magica“ ([75], S. 67). In einer deutschen Übersetzung des lateinischen Textes in den „Beiträgen zur Naturgeschichte“ aus dem Jahre 1752 zu dem Eintrag „...auch eine Zauberlaterne“ wird eine zugehörige Anekdote wiedergegeben, die Petits Bezeichnung „Laterne der Angst“ vielleicht erklärt ([76], S. 154):

„Es meinet Jacobaeus, der vortreffliche dänische Glaskünstler, (opticus) Thomas Walgenstein, habe alle andere in Verfertigung derselben [der Zauberlaterne, Anm. d. Verf.] übertrffen. Er zeigte, kurz vor Königs Friedrich des dritten²⁹ Tode, unter andern auch das Bild des Todes dadurch; alle andere erschraken, der König aber strafte ihre Furchtsamkeit, sagte, er könne dies Bild nicht oft genug sehen, und befahl dasselbe mehr als einmal vorzustellen.“

Ein anderer Entwurf stammt von Huygens selbst, der in einem Brief am 11. Dezember 1664 an Petit, ([77], S. 162) die Platzierung der Linsen und des Konkavspiegels erläutert. Auch wenn die Skizze in Abb. 3.27 auf den ersten Blick nicht besonders eindrucksvoll erscheint, so haben wir es hier prinzipiell mit dem noch heute verwendeten Aufbau eines Projektors zu tun. Die Bezeichnungen und die Position des Dias (in rot) wurden nur zur Erläuterung eingefügt. Im Original ist keine Beschriftung enthalten. In dem verflochtenen Strahlengang befindet sich die Lichtquelle (hier eine Kerze) vor einem Hohlspiegel (Reflektor) idealerweise in dessen Brennpunkt. Dieser Reflektor dient dazu, das von der Kerze entgegen der Projektionsrichtung abgestrahlte Licht, welches ansonsten ungenutzt verschwendet würde, wieder in die richtige Richtung umzuleiten. Mit diesem „Licht-Recycling“ erhält Huygens beinahe die doppelte Helligkeit. Eine Beleuchtungslinse (Kondensor) ist der Lichtquelle vorgesetzt. Auch hier sollte sich die Lichtquelle in der Nähe des Brennpunktes des Kondensors befinden. An der Planfläche des Kondensors ist die Filmbühne für das abzubildende, durchscheinende Objekt angebracht. Durch diese Anordnung wird dieses Objekt (Diapositiv=Dia) von einem beinahe parallelen Strahlenbündel beleuchtet. Schließlich wird das Dia über die Abbildungslinse (heute i. d. R. ein Objektiv) auf die Projektionswand abgebildet, wobei sich das Objekt gemäß Linsengleichung in der Gegenstandsweite, die Projektionswand in der Bildweite befinden muss.

²⁹Hier natürlich Friedrich der III. von Dänemark und Norwegen.

Im Gegensatz zu seinen bahnbrechenden optischen Erkenntnissen hatte Huygens seine Ideen zur Projektion nicht veröffentlicht, sondern nur mit seinen Brieffreunden ausgetauscht. Möglicherweise fürchtete Huygens um seine Reputation als ernsthafter Gelehrter, da die Zauberlaterne von Walgenstein, Kircher und anderen hauptsächlich zur gruseligen Unterhaltung des Publikums und weniger für wissenschaftliche Experimente eingesetzt wurde. Als Indiz dafür könnte ein Brief an seinen Bruder Lodewijk vom 19. April 1662 gelten, indem er ihm die Zusendung der versprochenen Laternen einigermaßen widerwillig zusichert und es eigentlich nur tut, weil er keine vernünftige Entschuldigung dafür finden konnte, es nicht zu tun ([74], S. 111).

Hintergrundinformation

Huygens formulierte später (1690) in seinem Buch „Traite de la lumiere“ [78] die Feststellung, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle angesehen werden kann; was heute als Huygenssches Prinzip bekannt ist. Huygens erklärt das selbst so (aus der deutschen Ausgabe v. Lommel [79], S. 21):

„Ich habe also gezeigt, auf welche Weise man sich die allmähliche Ausbreitung des Lichtes durch kugelförmige Wellen vorstellen kann.... Zunächst folgt nämlich aus den obigen Betrachtungen, dass jede kleine Stelle eines leuchtenden Körpers, wie der Sonne, einer Kerze oder einer glühenden Kohle, ihre Wellen erzeugt, deren Mittelpunkt diese Stelle ist.“

Diese Kugelwellen haben eine gemeinschaftliche Berührungsline, die als gemeinsame Wellenfront verstanden werden kann (aus [79], S. 24).

„.... so treffen sie sich gleichwohl nirgends sonst, als ... in ihrer gemeinschaftlichen Berührungsline, ..., um eine die Bewegung abgrenzende Linie zu bilden.“

Nachdem mit den Schriften von Kircher und Dechales die Laterna magica einer breiteren Öffentlichkeit bekannt wurde, tauchten in schneller Folge weitere Versionen der Lampe auf.

Johannes Christoph Sturm lieferte im „Collegium Curiosum“ von 1676 [80] neben allerlei physikalischen Experimenten auch eine schöne Zeichnung einer Projektionslaterne (Abb. 3.28):

In einer Zeichnung des Strahlenverlaufs sieht man die Funktionsweise (Abb. 3.29) und dabei gleich auch ein Problem: Wenn die beiden Linsen das Objektiv zur Abbildung darstellen, fehlt dem System die Kondensorlinse. Damit wird das projizierte Bild lichtschwächer sein, als es mit Kondensor der Fall gewesen wäre. Das ist nun gerade bei der Projektion mit einer Kerze als Lichtquelle unglücklich.

Möglicherweise handelt es sich bei der, von Sturm gezeichneten Laterne, um ein Gerät aus der Werkstatt des Optikers Griendel³⁰, der offensichtlich schon einige Jahre

³⁰Bekannt vor allem durch sein reich illustriertes Mikroskopiebuch „Micrographia nova“ [43].

Abb. 3.28 Laterna magica,
Johannes Sturm (1676) aus
[80], S. 164

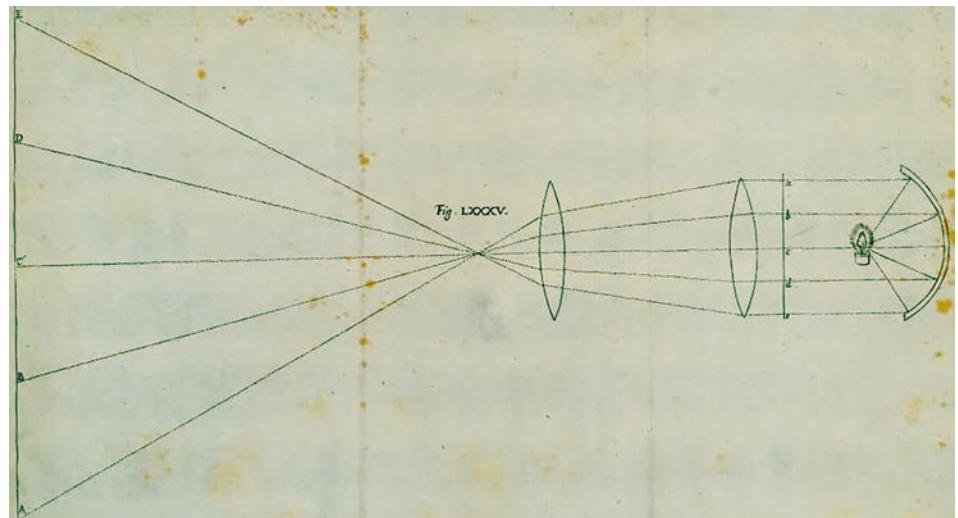
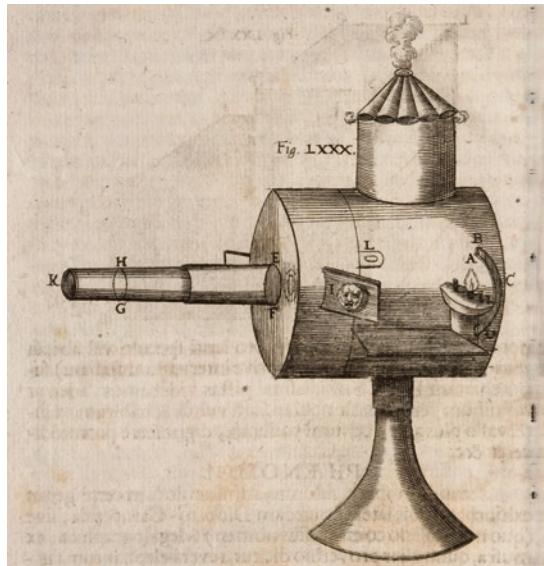
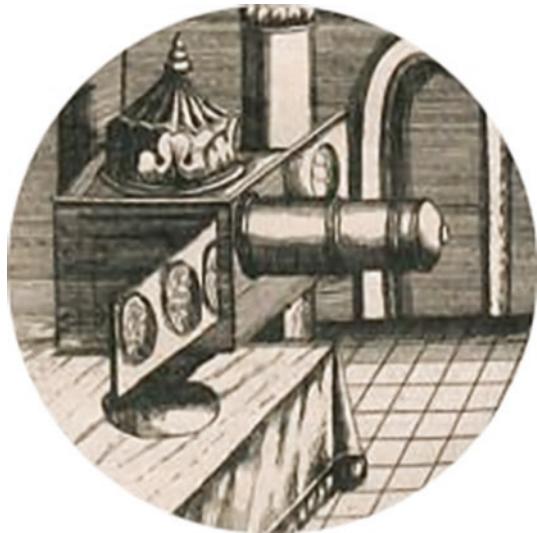


Abb. 3.29 Strahlengang in der Sturmschen Laterne, Johannes Sturm (1676) [80] Zeichng. zu S. 168

Abb. 3.30 Diaprojektor,
Johann Zahn (1702) aus [84],
S. 398



vor Sturms Veröffentlichung derartige optische Geräte baute³¹. Kohlhans beschreibt dann 1677 die Laterne des Griendl ([83], S. 318) so:

„Von einer optischen Latern / damit allerley Gemählde / in einem finstern Zimmer / klein und groß vor Augen gestellet werden: Eine solche Latern hat Herr Johann Frantz Gründel von Ach auf Wankhausen / fürnehmer Opticus in Nürnberg / erfunden / allerhand Bilder / was man vorstellig machen will / werden auf Gläser gemahlet / und durch die Latern geschoben und gezogen.“

Johann Zahn hatte 1685 eine mobile Kamera mit Spiegelablenkung, den Vorgänger aller heutigen Spiegelreflexkameras, vorgestellt. In späteren, fundamentalen Abhandlung über die Optik, der zweiten Ausgabe des „Oculus artificialis“ von 1702 [84] ist auf einer Doppelseite ein Diaprojektor für die Wiedergabe einer Bildsequenz dargestellt (s. Abb. 3.30).

Auf der gleichen Seite ist auch der zugehörige Strahlengang abgebildet. Die Abbildung in der Laterne ist nachfolgend am Beispiel seiner „Laterna megalographica“ illustriert (Abb. 3.31). Die Bezeichnung „Megalographie“ steht darin für „Großmalerei“.

Die von Zahn ebenfalls verwendete Bezeichnung „Laterna thaumaturga“ deutet auf die Verwendung der Lampe zur Erzeugung von Wundern hin, da der Thaumaturg ein „Wundertäter“ ist. Das ist nicht überraschend, wenn man die Lebenssituation des Johann Zahn betrachtet, der -wie schon Caspar Schott und Athanasius Kircher- nicht nur Wissenschaftler

³¹Zumindest scheint Griendl anlässlich eines Briefes an Leibniz am 28. Dezember 1671 ([81], S. 316–319) in einer Werbe-Beilage „Specificatio, was Johann Frantz Griendl von Ach, Mathematicus und Opticus in Nürnberg, von optischen Raritäten machen thut“ auch die Laterna magica zu erwähnen (s. [82], Fußnote 6).

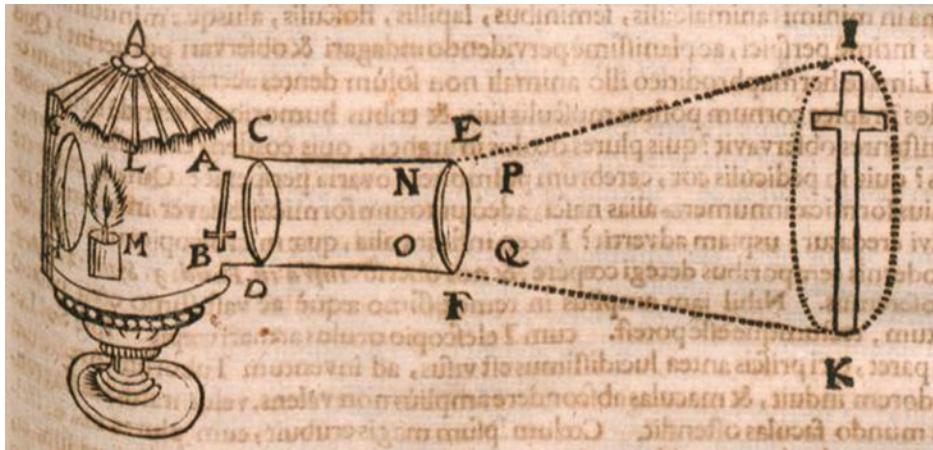


Abb. 3.31 Laterna megalographica, Johann Zahn (1702, S. 401)

und Lehrer, sondern gleichzeitig Mitglied des Prämonstratenserordens zu Oberzell und Probst in Unterzell (s. a. [85], S. 402) und damit ein aktiver Geistlicher war.

Wie schon Sturm, hatte auch Zahn auf eine Kondensorlinse verzichtet, dafür aber (wie Sturm) das Dia dicht an die Linse gerückt. William Molyneux verwendet in seiner „Dioptrica nova“ [86] 1692 den Namen „Magick Lantern“, erwähnt aber auch die von Zahn genutzte Bezeichnung „Laterna megalographica“. Die Zeichnung (Abb. 3.32) zeigt nun die korrekte Verwendung einer Kondensorlinse (allerdings fehlt dafür der Reflektor).

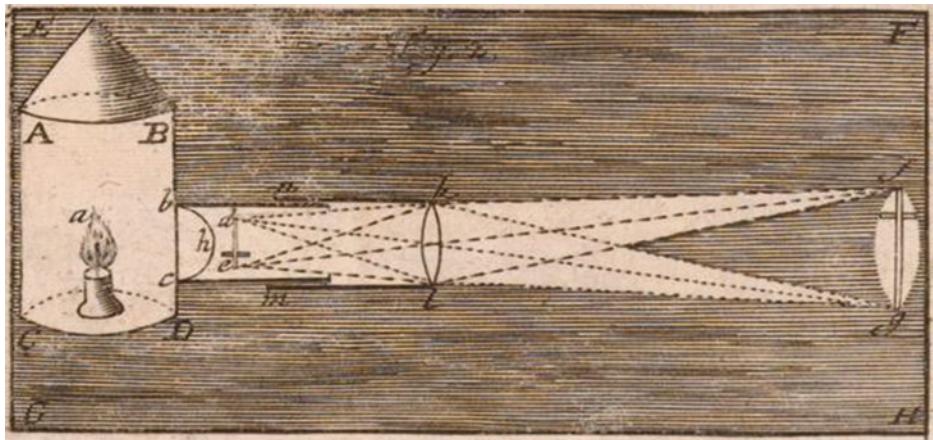


Abb. 3.32 Magick Lantern, William Molyneux (1692) aus [86], S. 182

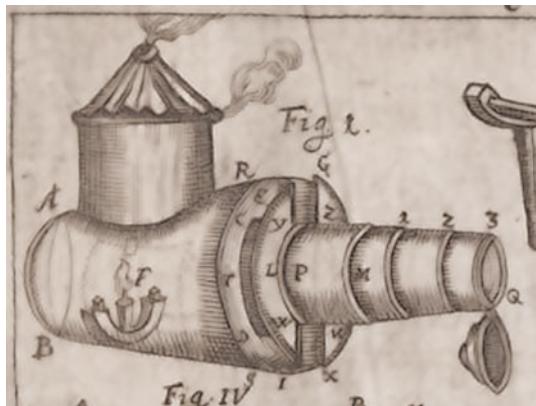
Das Molyneux-Problem

Der irische Naturforscher William Molyneux ist weniger für seine Wunderlampe, als für die Formulierung des „Molyneux-Problems“ bekannt, mit dem er 1693 den englischen Philosophen John Locke konfrontierte: Kann ein blind geborener Mensch die Gegenstände, deren Form er nur durch Fühlen kennt, diese später (wenn er plötzlich Sehen kann) nur der Ansicht nach wiedererkennen? Locke gibt in seinem in seinem Essay über die menschliche Wahrnehmung die Antwort „Nein.“ ([87], S. 67) Mit der Suche nach der Antwort auf diese Frage beschäftigten sich neben Locke u. a. auch Leibniz, Voltaire und Helmholtz. Abgesehen von diesen philosophischen Untersuchungen gibt es auch eine experimentelle Antwort.

In einem indischen Hilfsprojekt namens Prakash (was in Sanskrit „Licht“ bedeutet) (s. [88, 89]) soll blinden Kindern durch verschiedene Behandlungen und Operationen geholfen werden, wieder sehend zu werden. Im Jahre 2011 hatte man diesen blinden Kindern vor der Operation verschiedene Gegenstände zum Betasten gegeben. Nach der Operation sollten die nun sehenden Kinder versuchen, die Gegenstände wiederzuerkennen. Wie erwartet, gelang das nicht sofort, aber konnte sehr schnell erlernt werden [90].

Durch diese und andere Veröffentlichungen wurde das Thema einer gelehrten Minderheit bekannt und Thema wissenschaftlicher Analyse. In Jena verfasste Bonifatius Ehrenberger 1713 eine Schrift über die „neuartige und kuroise“ Laterna magica [91]. Ehrenberger schlägt vor, die Bilder mit Zahnrädern in eine mechanische Bewegung zu versetzen. Die Laterne selbst ist bis auf das teleskopartige Objektivrohr nicht ungewöhnlich (Abb. 3.33). Interessant ist aber Ehrenbergers Hinweis (S. 7) auf die vorherige Beschäftigung des Jenaer Mathematikers Weigel mit der Laterna magica. Die Aussage scheint glaubhaft, da einer der Schüler Weigels auch der bereits erwähnte Johann Christoph Sturm war. Sturm und Ehrenberger verfassten später gemeinsam ein Lehrbuch der Mathematik [92] mit einem Hinweis auf die Laterna magica (ebenda S. 41).

Abb. 3.33 Novum et Curiosum Laternae Magicae, Bonifacius Ehrenberger (1713) aus [91] eingelegtes Bild



3.3 Sonnenmikroskop

Projektion mit Solarkraft

Mit zunehmender Verbreitung der „Schreckenslaterne“ zum Ende des 17. Jahrhundert versuchten die Gelehrten den nunmehr bekannten physikalischen Effekt der Vergrößerung eines Objektes nutzbringend für die Wissenschaft einzusetzen. Die Idee eines Projektionsmikroskopes kann bei denjenigen, die gleichzeitig Kenntnis von der Funktion eines Mikroskopes, der Camera obscura und der Laterna magica hatten, als naheliegend angenommen werden.

Ein ernsthaftes Problem der Großbildprojektion mittels einer Kerze war bis dahin die geringe Helligkeit. Das Sonnenmikroskop nutzte nun die Strahlkraft der Sonne als Beleuchtung und erzeugte so ein unvergleichlich helleres Bild. Bedingt durch den Abstand der Sonne treffen die Sonnenstrahlen nahezu parallel auf die Erde. Man spart sich mit einer Sonnenbeleuchtung also nicht nur den rückwärtigen Sammelspiegel, sondern auch die Kondensorlinse und erhält so ein überaus einfaches Gerät zur mikroskopischen Beobachtung.

Als erste Beschreibung einer solchen Vorrichtung gilt zuweilen Theodor Balthasar. Balthasar vergleicht 1710 die Projektion eines Objektes auf ein Papier mit der Abbildung in einer Laterna magica (in [93], S. 119). Der Teilzeit-Mikroskopiker Ledermüller³² verteidigt in seinem Buch „Versuch zu einer gründlichen Verteidigung derer Saamenthiergen³³“ aus dem Jahre 1758 [96] nicht nur das „würckliche Leben derer Saamen-Würmer“, sondern auch gleich Balthasar als wahren Erfinder des Sonnenmikroskopes.

Zu dieser Zeit wurde das Sonnenmikroskop allgemein mit dem Namen Lieberkühn in Verbindung gebracht. Lieberkühn hatte der Royal Society ein Mikroskop vorgestellt, dessen Beleuchtung allein von der Sonne abhängig war. Baker³⁴ beschreibt das Gerät 1743 als „The Solar, or Camera obscura Microscope“ (in [97], S. 22) und erwähnt an dieser Stelle auch die durch den Optiker Cuff eingebrachten Verbesserungen. In der deutschen Übersetzung des Optikers Steiner³⁵ [99] ist dazu eine Zeichnung (Tab IV,

³²Zu dieser Zeit nach eigener Angabe Notar zu Nürnberg. Ledermüller ist auch Autor der „Mikroskopische[n] Gemüths- und Augen-Ergötzung“ [94].

³³Was es mit den Saamenthiergen auf sich hat, erhellte ein Buch des Medizinprofessors Nicolai von 1746: „Der Mensch ist seinem Ursprunge nach ein Wurm, und alle Menschen sind, ehe sie gebohren worden, nichts anders als kleine Saamenthiergen gewesen. Jeder Vater hat alle seine Kinder, ehe die Mutter noch mit ihnen schwanger gegangen, unter der Gestalt der Saamenthiergen bey sich getragen, und, enthält noch auf eben diese Art alle seine zukünftigen Kinder in sich.“ (aus [95], S. 101).

³⁴Henry Baker, veröffentlichte unter dem Pseudonym „Henry Stonecastle of Northumberland“ gemeinsam mit seinem Schwiegervater Daniel Defoe (Autor des Romans „Robinson Crusoe“) die Zeitschrift „The Universal Spectator“.

³⁵Daneben auch Übersetzer von Eulers Farbenlehre (aus [98], S. 97).

Abb. 3.34 Solar oder Microscopio in Camera obscura, Johann Ludwig Steiner (1756) aus [99] Tab IV

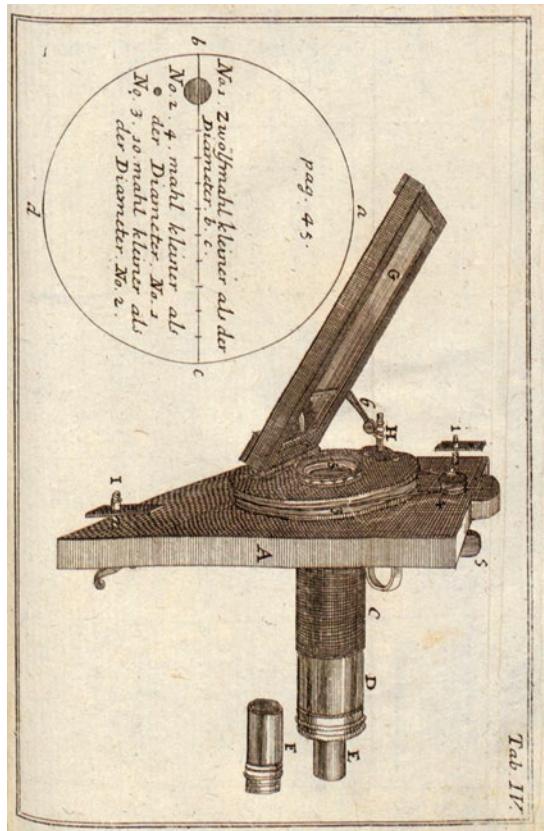


Abb. 3.34) und eine Beschreibung (VI. Kapitel, S. 24) wiedergegeben. Steiner erklärt das Prinzip sehr detailliert

„A ist ein viereckicht hölzern Brett durch welches zwei Schraube I i gehen, mit welchen man diß Brett an einem Fensterladen bequemlich fest machen kann. In der Mitte des Bretts ist ein rundes Loch, darin eine Hülse gestecket wird, und auf einer Seite vorgehet, an welcher ein hölzerne Wellen kommet, welche eine Darmsaite umgiebet, in der Mitte über dieser Wellen ist noch eine kleinere Welle von Messing, die zugleich zwey Umgäng von der Seiten hat, deren beyde Ende an der grösseren vest gemacht sind.; an der anderen Seiten der kleinen Wellen ist eine Handhab, welche die eine leichte Bewegung zuwegen bringet, um die hölzerne Welle B mit all ihrer Zugehörd herum zu treiben.“

Etwas umständlich, aber präzise beschreibt Steiner hierin die Drehvorrichtung des Spiegels. Ein Messingrohr C (interessanterweise wird empfohlen, das mit Seehundshaut zu überziehen) nimmt ein weiteres Messingrohr D (ohne Seehundshaut) wird in Rohr C geschoben und bildet nun mit einem kurzen (angelöteten) Rohr E die Aufnahme für das

Rohr F (Anschraubpunkt für die Abbildungsoptik, das „Microscopium“). Das Zimmer wird verdunkelt und das Gerät in den Fensterladen gesteckt, sodass der Spiegel G sich außen und der Tubus CDEF innen befindet. Der Planspiegel kann über das Scharnier und die Stellschraube H im Winkel verstellt werden. Der Spiegel wird so eingerichtet („in die rechte Ordnung gebracht“), dass das Sonnenlicht auf die Sammellinse 5 trifft (in der Zeichnung etwas schlecht zu sehen, natürlich in der Mitte der Welle). Steiner: „...., das ist, wann die Sonnenstrahlen durch das Glas 5 auf die weisse Wand dirigiert werden, und also ein perfect runden Schein vorstellen.“

Das zu mikroskopierende Objekt befindet sich auf einem Glasträger, der zwischen Beleuchtungsstrahlengang (Spiegel und Linse 5) und dem Abbildstrahlengang (im Objektivtubus F) zwischen zwei Messingplatten eingeschoben wird. Das ist in der Zeichnung durch die beiden Wülste am Tubus D dargestellt. Tubus D kann nun so eingeschoben oder ausgezogen werden, dass ein Objekt mehr oder minder im Brennpunkt der Linse liegt. Über die Verschiebung des Tubus F wird die Schärfe der Abbildung auf der Wand eingestellt.

Steiners Erläuterung zeigt die Ähnlichkeit zwischen der Camera obscura und dem Sonnenmikroskop. In seiner „Abhandlung vom Sonnenmikroskop“ schreibt Rußwurm³⁶ 1781 dazu dann treffend: „Der Schritt von der Zauberlaterne zu dem Sonnenmikroskop war also sehr kurz. Es war nicht viel mehr dazu nötig, als das erste Linsenglas der Zauberlaterne als ein Kollektivglas zu gebrauchen, und anstatt des zweiten ein mehr vergrößendes anzubringen“ (aus [100], S. 4).

Der Mathematiker Euler entwickelte aus der Idee der Camera obscura eine verbesserte Laterna magica als eine Art Sonnenmikroskop [101]. Er beschreibt in einem Brief³⁷ 1762 an die Prinzessin von Preußen (Friederike Charlotte von Brandenburg-Schwedt) nochmals seine Intension (in [102], S. 197): „Es kommt also darauf an, daß man ein Mittel finde, das in der Camera obscura befindliche Object so sehr als möglich zu erhellen, ohne daß das Licht in die Camera dringe.“

Diese Aufgabe hatte Euler mittels einer Auflichtbeleuchtung gelöst (Abb. 3.35). Im Bild ist auch keine Sonnen-, sondern nur eine Kerzenbeleuchtung dargestellt. Solche Wunderkameras³⁸ werden heute als Auflichtprojektor oder Episkop bezeichnet.

³⁶Wilhelm Friedrich von Gleichen-Rußwurm.

³⁷Im 196. Brief, im Original in frz., hier in der dt. Übersetzung von 1780.

³⁸Die Bezeichnung Wunderkamera wird zumindest von Liesegang für das Episkop verwendet (s. [67]). Vielleicht aus der Zusammensetzung von **Camera** obscura und **Laterna magica** zu **Camera magica**.

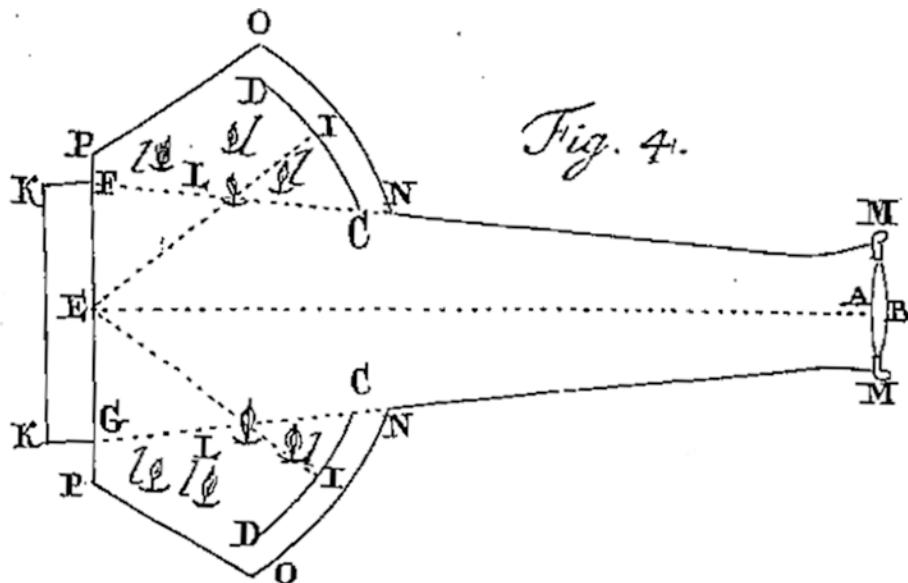


Abb. 3.35 Camera Magica, Leonhard Euler (1753) aus [101], S. 381

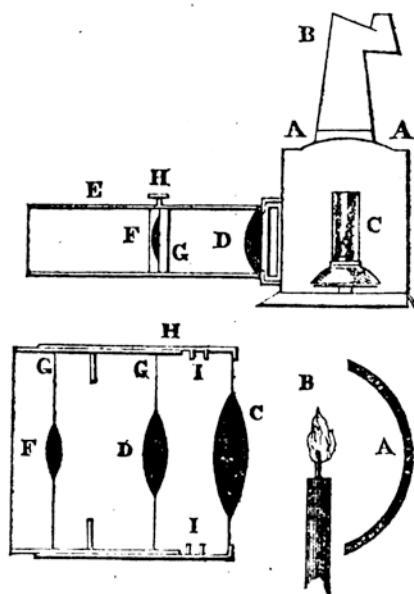
3.4 Bewegte Bilder

Wunderrad und Schnellseher

Die Wiedergabe eines Bildes macht aus der Camera obscura eine Laterna magica. Durch eine Überlagerung von Einzelbildern verschmelzen die Perspektiven zu einem Eindruck von Bewegung. Aber erst durch die permanente Aufzeichnung des latenten Bildes wird aus dem reinen Sichtgerät der Camera obscura eine fotografische Kamera. Durch die Wiedergabe der aufgezeichneten Bilder in einer Bildsequenz wird schließlich die Laterna magica zum Filmprojektor.

Eine eingeschränkte Form der Projektion von Bewegung als Bildfolge oder mittels Bilddrehung hatten schon Kircher, Zahn oder Ehrenberger beschrieben. Ein realistischer Eindruck entsteht aber, wenn die Bilder dabei überblendet werden. Die Bezeichnung „Nebelbild“ beschreibt nicht nur die Überblendung zweier nachfolgend abgespielter Einzelbilder, sondern auch die mitunter gewünschte Unschärfe der Bildprojektion während des Bildwechsels (durch Verstellung des Projektionsobjektives in den Unschärfebereich).

Abb. 3.36 Phylidors phantasmagorische Laterne,
William Charlton Wright
(1825) aus [105], S. 314



Der Effekt geht schon auf das Ende des 18. Jhdts. und den Illusionisten Phylidor³⁹ zurück. Über Phylidors Herkunft ist wenig bekannt, dafür sind zahlreiche seiner Auftritte, insbesondere in Geisterbeschwörung und schwarze Magie, von Zeitzeugen überliefert⁴⁰. In London erweiterte er - nunmehr unter dem Namen Philipsthal – seine Darstellungen in London um die Phantasmagorie (auch Phantasmagoria). In einer Erläuterung seiner Zaubertricks von 1825 [105] ist auch seine magische Laterne dargestellt (Abb. 3.36).

Philipsthal überblendete zwei unterschiedliche Bilder, um erstaunliche Effekte zu erzielen. Eine bekannte Vorführung war die Überblendung der Hexe von Endor⁴¹ mit dem Geist von Samuel (mittels zweier „Laterna magica“). Diese Präsentationen wurden von Philipsthal später aber auch um die Überblendung von Landschaften ergänzt [106]. In England wurden diese Überblendungen allgemein als sich auflösende Ansichten „sich auflösende Ansichten“ (dissolving views) bezeichnet [107].

³⁹Vermutlich ist Phylidor mit Philidor/Philidore/Phillidore und auch mit Paul de Philipsthal identisch, wie die Zauberkünstler Schirmer und Scholl 1805 berichten [103]: „...Mr. Phillidore, alias Philipsthal...“ (S. 15), „...Mr. Philidore, alias Philipsthal...“ (S. 16) und „...Mr. Philidore, alias Philipsthal...“ (S. 19).

⁴⁰Z. B. „Der entlarvte Phylidor als Schwarzkünstler, Geister-Citirer, und Charlatan“ (in [104], S.

⁴¹Ein Wahrsagerin und Totenbeschwörerin aus der biblischen Geschichte, die den Geist des verstorbenen Propheten Samuels beschworen, nachzulesen im Ersten Buch Samuel, Kap. 28.

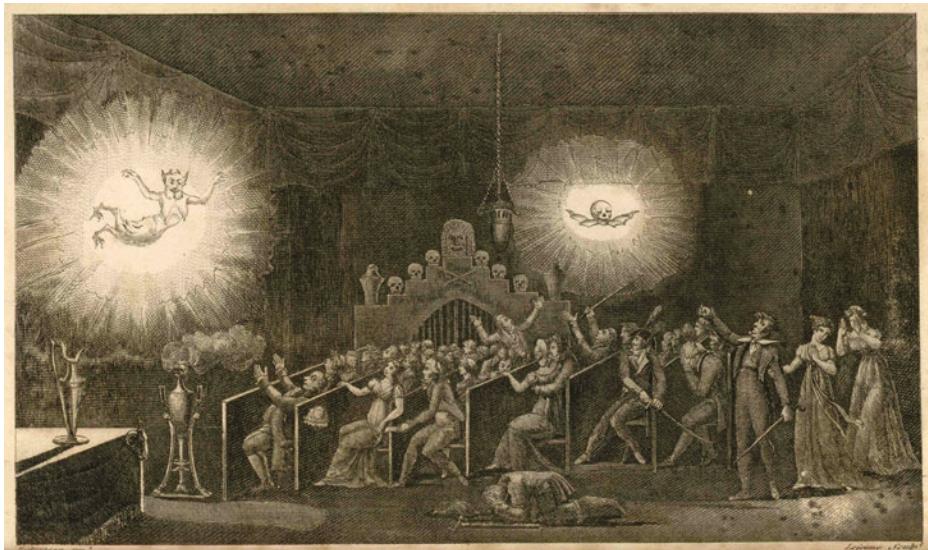


Abb. 3.37 Phantasmagorie, Étienne-Gaspard Robertson (1831) aus [110]

Philipsthal erhielt auf seine Phantasmagorie am 26. Januar 1802 ein königliches Patent ([108], S. 303–305):

„Specification of the Patent granted to Mr. Paul de Philipsthal, of the Lyceum, in the Strand, in the County of Middlesex, Gentleman; for his Invention of representing, in a dark Space or Scene, the human Figures, in various Characters, Proportions, and Sizes, and by which Means Painters and other Artists may accurately enlarge or diminish any painting with more certainty and facility than has hitherto been known or done*.

Dated January 26, 1802.

This invention is now publicly exhibited under the name of the Phantasmagoria“

Zur gleichen Zeit wie Philipsthal tritt auch der belgische Zauberkünstler Robertson mit seine Phantasmagorien auf [109]. Nach eigener Auskunft war Robertson zunächst Professor für Physik⁴² am College des Ourthedepartements⁴³, wendete sich aber schnell der Phantasmagorie zu. Seine Präsentationen waren besonders zum Schrecken des Publikums und weniger zur Erbauung gedacht, wie eine Zeichnung auf dem Inneneinband des ersten Bandes seiner Memoiren deutlich illustriert [110] (Abb. 3.37).

⁴²Ein Professor für Physik an einem College in Frankreich ist nach deutscher Betrachtung i. d. R. ein Physiklehrer an einer höheren Schule. Die Amtsbezeichnung Gymnasialprofessor war auch in Deutschland üblich.

⁴³Das Département de l'Ourthe (benannt nach dem Fluss Ourthe) war von 1795 und 1814 ein belgisches Department der Republik Frankreich.

Auf dem Bild sieht man das, was sich Robertson von seinem Publikum erhofft hatte: Ein Zuschauer liegt von Angst gepackt am Boden, ein tapferer Soldat zieht seinen Säbel, eine Dame muss in den Arm genommen werden, andere schlagen die Hände vors Gesicht, wenden sich ab oder lobpreisen die Erscheinungen. Der Raum ist gefüllt mit Rauch, auf den der Illusionist seine Schreckenvisionen abbildet. Das Gerät, mit dem Robertson die Bilder auf den Rauch projiziert nennt er „Fantascope“. Für dieses Gerät erhielt Robertson in den Wirren der französischen Revolution ein Patent N°. 2755 (aus [111], S. 14⁴⁴):

„Am 27. Ventôse des Jahres VII erhielt er ein Patent der Erfindung für fünf Jahre, an diesem Tag, an Étienne-Gaspard C. Robert, Professor der Physik, wohnhaft in Paris, rue de Provence, n. 24 zu dem Zweck, in der ganzen Republik dieses zu konstruieren, zu bauen und zu verkaufen, einen Apparat, den er Fantascope genannt hat, und den er zur Vervollkommnung von Kirchers Laterne vorgesehen hat, allgemein magische Laterne genannt;...“

Nach der französischen Revolution von 1789 wurde mit dem „Décret de la Convention nationale portant sur la création du calendrier républicain“ [112] ab dem Jahre 1792 der Französische Revolutionskalender eingeführt, der den Beginn des Jahres I (Jahr Eins der Freiheit) auf den Tag nach dem Sturm auf die Bastille (also auf den 15. Juli 1789) legte. Allerdings beginnt die Zählung noch einmal mit Jahr I (Jahr I der Republik) nach Abschaffung der Monarchie am 22. September 1792 durch den Nationalkonvent. Dabei wurde nicht nur eine dezimale Zeiteinteilung erfunden (ein Tag hatte 10 h zu je 100 min à 100 s), sondern auch völlig neue Monatsnamen. Der 27. Ventôse (Windmonat) des Jahres VII im republikanischen Revolutionskalender ist demzufolge der 17. März des Jahres 1799 im gregorianischen Kalender (Umrechnungstafel aus [113], S. 3).

In Robertsons Memoiren [110] findet sich neben vielen Darstellungen und Erläuterungen seiner Zaubertricks im Kapitel über die „Fantasmagorie“ auch eine Zeichnung zum Fantascope“ (s. Abb. 3.38). Im Prinzip haben ist es auch hier eine übliche Laterna magica mit Lichtquelle, Reflektorschirm und Kondensorlinse.

Die Verbreitung der Phantasmagorie und der verschiedenen Arten von Zaubertricks forderte eine wissenschaftliche Analyse heraus. Kein Geringerer als David Brewster widmete sich in dem Buch „Letters on Natural Magic“ [114] dieser Aufklärung und beschrieb die Funktionsweise von Zaubereien; neben der Illusion von Kircher, Robertson und Philipstal auch anderen optischen, mechanischen oder chemischen Tricks.

⁴⁴Eigene Übersetzg., im Original: „LE 27 ventôse de l'an VII, il a été délivré un brevet d'invention pour cinq années, à compter dudit jour, au C.^{en} Étienne-Gaspard Robert, professeur de physique, demeurant à Paris, rue de Provence, n.^o 24, à l'effet de construire, faire construire, et vendre dans toute l'étendue de la République, un appareil qu'il a nommé *fantascope*, et qu'il a annoncé être le perfectionnement de la lanterne de Kircher, vulgairement appelée *lanterne magique*; à la charge de suivre les procédés dont il a fourni les dessins et le mémoire explicatif.“

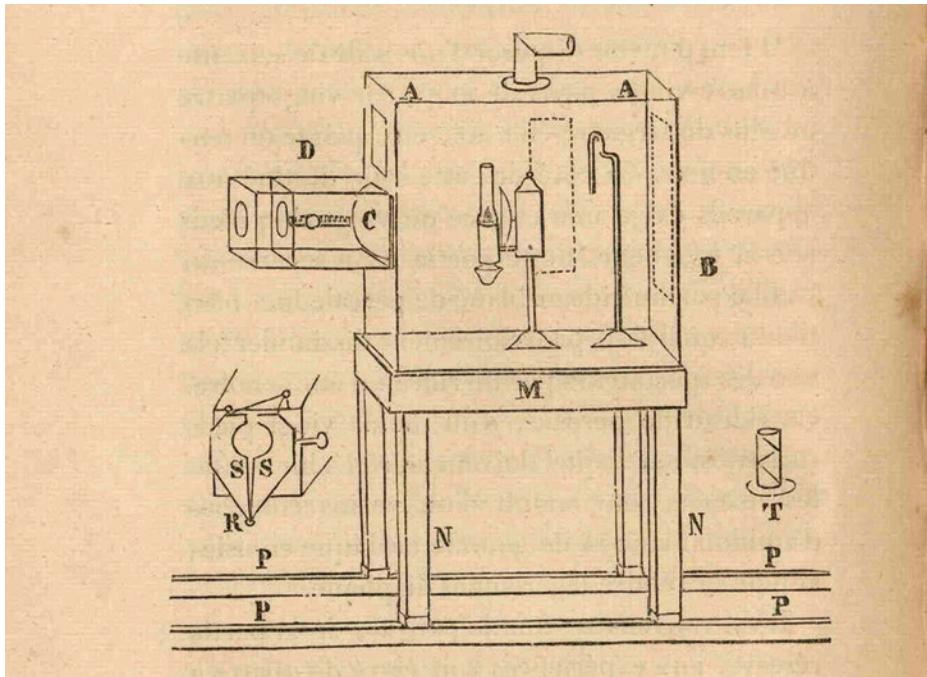


Abb. 3.38 Fantascope, Étienne-Gaspard Robertson (1831) aus [110], S. 326

Robertson war aber nicht nur Entertainer. Neben seinen Geisterbeschwörungen war er auch ein Pionier der Ballonfahrt. In einem Aufsatz berichtet er detailliert von seinem Aufstieg auf 3600 Toisen⁴⁵ (etwa 7000 m) [115]. Die Ballonfahrt mit dem Hamburger Kaufmann Lhoest (auch L’Hoest) vom 18. Juli 1803 [116] endete beinahe in einer Katastrophe [117]:

„Die Kälte war nicht ausserordentlich, aber das Sausen vor den Ohren nahm zu, und ein starkes Uebelbefinden schien alle Geistesthätigkeit zu lähmen. Da ich mich durch etwas Wein gestärkt hatte, fieng ich einige Experimente an, mit denen ich aber nicht zufrieden war. Ich schlug daher meinem eifrigen Begleiter vor, noch höher zu steigen, wozu dieser, ob er sich gleich ebenfalls übel befand, doch gern einwilligte. Wir warfen von Zeit zu Zeit wieder Ballast aus. Das Queksilber des Barometers fiel bis zu 12 4/100 Grad. In dieser Höhe war die Kälte auswärts der Gondel unerträglich, obgleich der Thermometer nur 1 Grad unter dem Gefrierpunkte stand; wir mußten schneller athmen, und der Puls gieng äusserst heftig. Wir konnten kaum dem Schlafe widerstehen, der sich unsser bemächtigen wollte. Das Blut schoß uns nach dem Kopfe, und H. Lhoest bemerkte, daß es mir in die Augen träte. Mein Kopf war so angeschwollen, daß ich den Hut nicht mehr aufsezzen konnte.“

⁴⁵Eine Toise de Paris entsprach 6 Fuß zu je 12 Daumenbreit, heute etwa 1,96 m.

Robertson und Lhoest überstanden jedoch ihr Abenteuer. Und so finden sich erst auf dem Grabmal des Robertson auf dem Friedhof Père Lachaise zu seinem ungewöhnlichen Leben außerordentlich lebendige Reliefs, die von Geisterbeschwörungen und Ballonfahrten handeln.

Diese Art der Vorführungen mittels doppelter Laterna magica wurden von Henry Childe ab 1822 in ähnlicher Weise wiederholt und später von Edward Clarke mit dem „Biscenascope“ auf einen Doppelprojektor reduziert [107]. Ludwig Döbler macht diese in England als „Dissolving views“ bekannte Technik im deutschen Sprachraum als „Nebelbilder“ salonfähig.

Projektionszaubereien

Der erfolgreiche Wiener Magier Ludwig Döbler begeisterte in der Mitte des 19. Jhdts. das Publikum nicht nur mit seinen Zaubertricks, sondern ganz besonders mit seinen Nebelbildern [118].

Döbler führte seinen Nebelbildapparat im Januar 1847 im Theater in der Josephstadt (Wien) vor. Der Redakteur des Österreichischen Morgenblatts beschreibt seinen Eindruck:

„Die heutige Vorstellung ist sicher ein neuer, ehrenvoller Fortschritt seines Strebens auf dem Felde der Optik. ... In der zweiten Abtheilung sehen wir Nebelbilder mit beweglichen Figuren. Die Lösung dieser optischen Aufgabe, die unseres Wissens dem Erfindungstalente Döbler's allein angehört, war jedenfalls befriedigend, ... Am meisten gefiel uns die täuschende Beweglichkeit des „türkischen Gauklers, des „Reifspringers“ und des „Seiltänzers“...“ [119].

In den Jahren nach der ersten Vorführung findet man auch die Bezeichnung „Döblers Nebelbilder“⁴⁶.

Döblers Bekanntheitsgrad ging deutlich über Wien hinaus. Er trat auch vor dem russischen Zar Nikolaus [118] oder dem König von Preussen⁴⁷ auf und traf schließlich in Weimar sogar Goethe. Auf den Wunsch Döblers hin, widmete Goethe ihm noch eine Zeile: „Bedarfs noch ein Diplom besiegt, unmögliches hast du uns vorgespiegelt.“ [121]

Mindestens ebenso bekannt wie Döblers Nebelbilder war einige Jahre später „Pepper's ghost“. Der Zaubertrick hat dabei nichts mit Pfeffergeist zu tun, sondern ist nach seinem Erfinder⁴⁸, dem Londoner Lehrer Pepper, benannt. Die Idee dahinter ist einfach, es handelt sich um einen simplem Spiegeltrick. Hinter einer Scheibe, die um 45 Grad geneigt ist, befindet sich die Bühne. Auf dieser hell erleuchteten Bühne findet die Vorstellung statt. In einen anderen Teil der Bühne, der vom Zuschauer nicht einsehbar ist, wartet der „Geist“ oder irgendeine Person, die überraschend

⁴⁶Z. B. in verschiedenen Ankündigungen der „Vorstellung von Döblers optischen Nebelbildern“ im Königlichen Hof- und National-Theater München (1845) [120].

⁴⁷In Töplitz im Sommer 1831 vor Friedrich Wilhelm II [121].

⁴⁸Wobei als Erfinder auch Henry Dircks genannt werden soll [122], der vermutlich mit seiner Fantasmagorie „The Ghost“ die initiale Idee lieferte [123] und schließlich mit Pepper gemeinsam ein Patent anmeldete (s. a. [124], S. 4–12).

erscheint, auf den Auftritt. Wird der Geist beleuchtet, wird dieser im gekippten Spiegel reflektiert. Bei geeigneter Kippung des Spiegels erscheint der Geist dem Zuschauer nun ebenfalls auf der Bühne. Dieser Effekt wird heute mitunter fälschlich als Hologramm bezeichnet⁴⁹.

Der Nebelbildapparat von Döbel konnte mehrere Bilder in schneller Folge nacheinander und damit bereits eine kurze Animation wiedergeben. Eine mechanische Alternative zur Überblendung im Nebelbild stellt die abwechselnde Darstellung zweier Einzelbilder dar. Eine Scheibe, die auf der Vorder- und Rückseite mit unterschiedlichen Bildchen bemalt ist, vermittelt bei Drehung um eine Achse die Illusion der Überblendung dieser beiden Bilder. Diese einfache Erläuterung beschreibt die Funktionsweise eines Thaumatrops, der „Wunderscheibe“.

Natürlich ist die Einfachheit eines Thaumatrops für sich genommen beinahe schon der Beweis für dessen allgegenwärtiges Vorhandensein. Verführt durch diese Möglichkeit, halten die der Prähistoriker Azéma und der Experimental-Paläontologe Rivière aufgefondene Knochenscheibchen aus der Steinzeit mit zwei eingeritzten Bildern und einem Loch in der Mitte für ein prähistorisches Thaumtrop [126]. Das von Ihnen vorgestellte Experiment erlaubt sicherlich diese Interpretation, aber liefert keinen unumstößlichen Beweis. Es könnte auch einfach nur ein Knopf gewesen sein...

Ein Thaumtrop kann leicht erstellt werden. Die Drehung einer Münze macht aus den Bildern von Kopf und Zahl ein Mischbild und ist jedem Schulkind oder Kneipengänger geläufig. Die neuzeitliche Entdeckung des Thaumatrops war dennoch Gegenstand von Diskussionen. In einem Artikel schreibt Claudet von der Einfachheit der „Erfindung“ ([127], S. 425):

„Mir wurde gesagt, dass, als Sir John Herschel⁵⁰ eines Tages dieses Experiment machte, um seine Kinder in Anwesenheit des Dr. Paris zu unterhalten, dieser Herr auf die Idee kam, dass, wenn statt einer Münze eine weiße Karte verwendet würde, bei der auf jeder Seite ein Teil einer Zeichnung richtig geändert wurde, könnten sich die zwei Teile des Bildes während der Umdrehung vervollständigen.“⁵¹

⁴⁹So übernahm z. B. der Spiegel anlässlich der Grammy Verleihung 2006 unkritisch die falsche Reuters-Beschreibung von Madonnas Auftritt: „Madonna (L) performs from behind a holographic screen with a holographic Gorillaz performer.“ (aus [125]).

⁵⁰Nicht zu verwechseln mit seinem Vater, dem nicht minder berühmten Astronomen Wilhelm Herschel, der neben dem Uranus auch die Infrarstrahlung entdeckt hatte [128].

⁵¹Eigene Übersetzung, Original: „I have been told that as Sir John Herschel was one day making this experiment to amuse his children, in the presence of the late Dr. Paris, this gentleman was struck with the idea that if, instead of a coin, a white card was employed on each side of which one part of a design was properly changed, the two might complete the subject during the revolution.“



Abb. 3.39 Das Thaumatrop. John Ayrton Paris (1827) aus [130], S. 338

Paris setzte seine Idee tatsächlich in die Tat um, wie eine Ausgabe seines Buches⁵² „Philosophy in Sport“ von 1827 beweist [129]. Dort kommt das Thaumatrop als lehrreiches Spielzeug vor, mit dem es gelingt, aus zwei einzelnen Bildern ein Gesamtbild zur erstellen. In der ersten Illustration wird die Bedienung illustriert. An zwei Schnüren gespannt kann sich die Scheibe, die beidseitig bebildert ist nunmehr schnell um die durch die Schnur gebildete Achse (Abb. 3.39).

Eine weitere Skizze zeigt die grundsätzliche Idee der Bildanordnung. Auf einer Seite der Pappscheibe ist ein leerer Käfig gezeichnet, auf der anderen Seite eine Maus. Dreht die Scheibe an den seitlich angebrachten Schnüren, so scheint die Maus sich bald in dem Käfig zu befinden (Abb. 3.40).

Hintergrundinformation

Das Thaumatrop ist also ein sehr einfaches Spielzeug und die Idee dazu naheliegend. Trotzdem schien es dem bekannten Mathematiker Babbage noch beinahe 40 Jahre nach der Vorstellung von Paris' Thaumatrop notwendig, auf den vermeintlichen Verursacher dieser Spielerei hinzuweisen.

Babbage erwähnt in seinen Memoiren 1864 eine Begebenheit, die er für den Ursprung des Thaumatrops hielt ([131], S. 189):

Eines Tages fragte Herschel, der nach dem Essen mit mir saß und sich amüsierte, indem er eine Birne auf den Tisch drehte, plötzlich, ob ich ihm im selben Augenblick zwei Seiten eines Schillings zeigen könne.

Ich nahm einen Schilling aus meiner Tasche, hielt ihn vor einem Spiegel hoch und demonstrierte so meine Methode. „Nein“, sagte mein Freund, „das geht so nicht.“ Dann ließ er meinen Schilling auf dem Tisch rotieren und zeigte damit seine Methode, beide Seiten

⁵²Das Buch erschien anonym, wird aber allgemein Paris zugeschrieben.

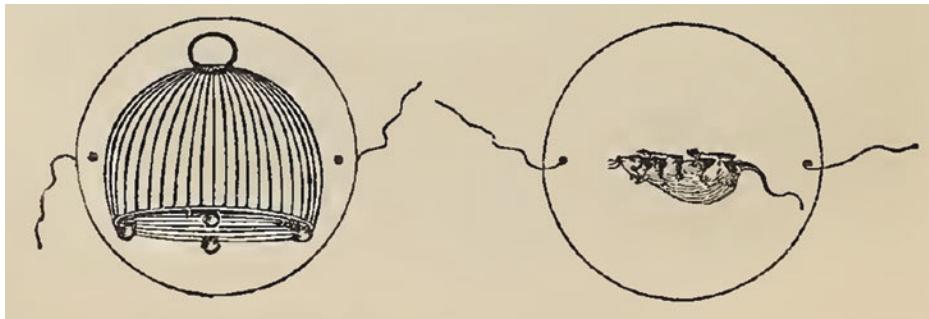


Abb. 3.40 Käfig und Maus, John Ayrton Paris (1827) aus [130], S. 338

gleichzeitig zu sehen. Am nächsten Tag erwähnte ich diese Anekdote an gegenüber Dr. Fitton, der mir einige Tage später eine schöne Illustration dieses Prinzips brachte. ... Auf der einen Seite dieser Scheibe war ein Vogel gemalt, auf der anderen Seite ein leerer Vogelkäfig. Als er den Faden schnell drehte, schien der Vogel in den Käfig zu gehen.⁵³

Nach Babbage wäre die Maus im Käfig demzufolge nur eine spätere Interpretation des Vogels im Käfig und somit Herschel und Fitton als Erfinder zu nennen – insofern man überhaupt bereit ist, ein so einfaches Ding eine Erfindung zu nennen.

Dieser kleine Wechsel aus zwei Einzelbildern kann wohl schwerlich als Animation bezeichnet werden. Immerhin gelingt aber hier schon eine Überblendung zweier unterschiedlicher Bilder zu einem Gesamtbild. Obgleich die Bilder nicht gleichzeitig vorhanden sind, sondern nacheinander, scheint das Bild nicht sofort aus der Wahrnehmung zu verschwinden. Diese Erkenntnis hatte der Physiologe Roget schon 1825 gewonnen. Er beobachtete die Illusion einer Krümmung der geraden Speichen eines Wagenrades, wenn man diese durch einen venezianischen Fensterschirm (ein Fensterladen mit Lamellen) betrachtet. Roget kommt dabei zu einer Feststellung, die grundsätzlich für die Funktion jeder Animation ist ([132], S. 98):

„Der wahre Grund der Täuschung ist also derselbe, ..., nämlich der, dass der Eindruck, den ein hinreichend lebhaftes Strahlenbündel auf die Netzhaut macht, eine gewisse Zeit hindurch verbleibt, wenn schon die Ursache dazu aufgehört hat“.

⁵³Eigene Übersetzung, Original: „One day Herschel, sitting with me after dinner, amusing himself by spinning a pear upon the table, suddenly asked whether I could show him two sides of a shilling at the same moment. I took out of my pocket a shilling, and holding it up before the looking-glass, pointed out my method. „No, „ said my friend, „that won’t do;“ then spinning my shilling upon the table, he pointed out his method of seeing both sides at once. The next day I mentioned the anecdote to the late Dr. Fitton, who a few days after brought me a beautiful illustration of this principle. ... Upon one side of this disc card was painted a bird, upon the other side, an empty bird cage. On turning the thread rapidly, the bird appeared to have to go inside the cage.“

Faraday untersuchte in seiner Abhandlung „Über optische Täuschungen besonderer Art“ ein ganz ähnliches Phänomen. Durch die Überlagerung zweier Bewegungen oder einer Bewegung mit einem feststehenden Gitter kann die Illusion einer neuen, anders gerichteten oder in der Geschwindigkeit abweichenden Bewegung entstehen. Faraday kommt zu demselben Befund wie bereits Roget ([133], S. 86):

„Die Ursache dieser und mehrerer damit zusammenhängender Erscheinungen liegt zu Tage. Das Auge behält bekanntlich Eindrücke eine gewisse Zeit hindurch, und daher kommt es, daß Erscheinungen, die in kurzen Zeiten wiederkehren, als miteinander verbunden und einen continuirlichen Eindruck machend sich zeigen.“

Kaleidoskop und Kaleidophon

Faraday weist in dem Artikel ([133], S. 86) dann auch auf die „prachtvollen Phänomene des Kaleidophons“ hin, die deshalb kurz erläutert werden sollen. Wheatstone beschrieb 1827 das „Phonische Kaleidoskop“ in Anlehnung an Brewsters „Kaleidoskop“ als ein Gerät, um Figuren aus leuchtenden Punkten zu formen. Auch Wheatstone erkannte die scheinbare Dauer des Seheneindrucks als die Grundlage des Entstehens der Wahrnehmung einer Figur (aus [134], S. 351).

... die Eigenschaft des Sehens, die die scheinbare Dauer an den gleichen Stellen der sichtbaren Bilder anordnet, nachdem die Objekte, die sie erregen, ihre Positionen geändert haben...⁵⁴

Wheatstone weist darauf hin, dass diese Beobachtung bereits 1765 von d'Arcy gemacht wurde. D'Arcy hatte eine Vorrichtung vorgestellt, mit der ein leuchtender Punkt auf einer Kreisbahn bewegt werden konnte. In dem Artikel „Die Dauer der Sehempfindung“ (Durée de la sensation de la vue) [135] wird ein Experiment d'Arcys beschrieben, in dem er ein Stück glühender Kohle auf einer Kreisbahn bewegt und so den Anschein eines Feuerrings erzeugt. D'Arcy bestimmte die Dauer des Eindrückes mit 8 Terzien⁵⁵, was nach heutiger Bezeichnung 0,133 s entspricht. Damit wäre nach d'Arcy für die Wahrnehmung einer kontinuierlichen Bewegung von mindestens 7,5 Umdrehungen pro Sekunde notwendig gewesen.

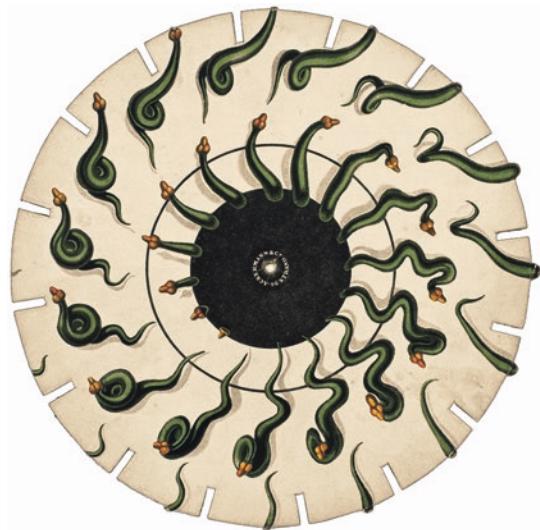
Interessant ist ein weiteres Experiment d'Arcys, bei dem er eine Szene durch eine drehende, undurchsichtige Scheibe beobachtete. In diese Scheibe war eine Öffnung angebracht, durch die er die Umgebung beobachtete. Bei ausreichender Drehgeschwindigkeit der Scheibe konnte das beobachtete Objekt wieder als Ganzes wahrgenommen werden ([135], S. 21). Das erinnert doch schon sehr an die Nipkow-Scheibe, die Paul Nipkow mehr als 100 Jahre später patentieren ließ (dazu später mehr).

Auch Plateau war mit den Arbeiten von Roget und d'Arcy vertraut, wie ein Blick in seine „Dissertation über einige Eigenschaften der durch Licht auf dem Sehorgan erzeugten Eindrücke“ (Dissertation sur quelques propriétés des impressions produites par la lumière sur l'organe de la vue) aus dem Jahre 1829 verrät [136]. Seine

⁵⁴Eigene Übersetzung, Original: „As the property of vision which occasions the apparent duration in the same places of visible images, after the objects which excite them have changed their positions...“

⁵⁵Eine Terzie oder Tertie ist der 60. Teil einer Sekunde (Sexagesimalsekunde).

Abb. 3.41 Fantascope –
Serpent surgissant du centre du disque, Joseph Plateau (1833),
Hersteller: Ackermann & Co.,
96 Strand“, Catalogue des
appareils de la Cinémathèque
française, Paris, Ref N°:
AP-94–212, Basile Morin
(2019), Wikimedia Commons



Nachbild-Experimente mit einfachen Strukturen zusammen mit der Kenntnis des Thaumatrops⁵⁶ führen ihn in der Folge zu einer echten Animation. Er beschreibt einen Apparat namens „Phénakisticope“⁵⁷, der nach seinen Angaben in Anlehnung an seine Idee zu dieser Zeit bereits in London unter dem Namen „Fantascope“ (Abb. 3.41) verkauft wurde [136].

Dieser Apparat bestand im Wesentlichen aus einer Pappscheibe, am Umfang mit einer gewissen Anzahl von kleinen Öffnungen oder Schlitzen durchbohrt ist und bemalte Figuren auf einer Seite aufweist. Betrachtet man die Reflexion der Figuren dieser Scheibe beim Drehen um ihre Mitte vor einem Spiegel, nimmt man die Illusion einer Bewegung der Figuren wahr. Lubschez hat in seiner „Story of the Motion Picture“ [138] von dem Phenakistiskop eine Skizze angefertigt, bei dem die Schlitzscheibe von der Bildscheibe getrennt ist. In der Zeichnung (Abb. 3.42) ist auf der linken Seite die Version für eine Darstellung über einen Spiegel abgebildet, auf der rechten Seite ein Betrachter, bei dem kein Spiegel mehr benötigt wird (dies ist im Prinzip Plateaus spätere Idee, die noch vorgestellt wird).

Eine ausführlichere Untersuchung findet sich in den Annalen der Physik und Chemie von 1834 in einem Artikel über „Stroboskopische Scheiben, Phänakistikop, Phantasmaskop“ ([139], S. 636–649).

⁵⁶Plateau genügte dabei eine kurze Zusammenfassung aus dem informativen Nachschlagewerk „Manuel de physique amusante“ [137].

⁵⁷Phenakistiskop: aus griech. phenax = Täuscher und skopein = betrachten.

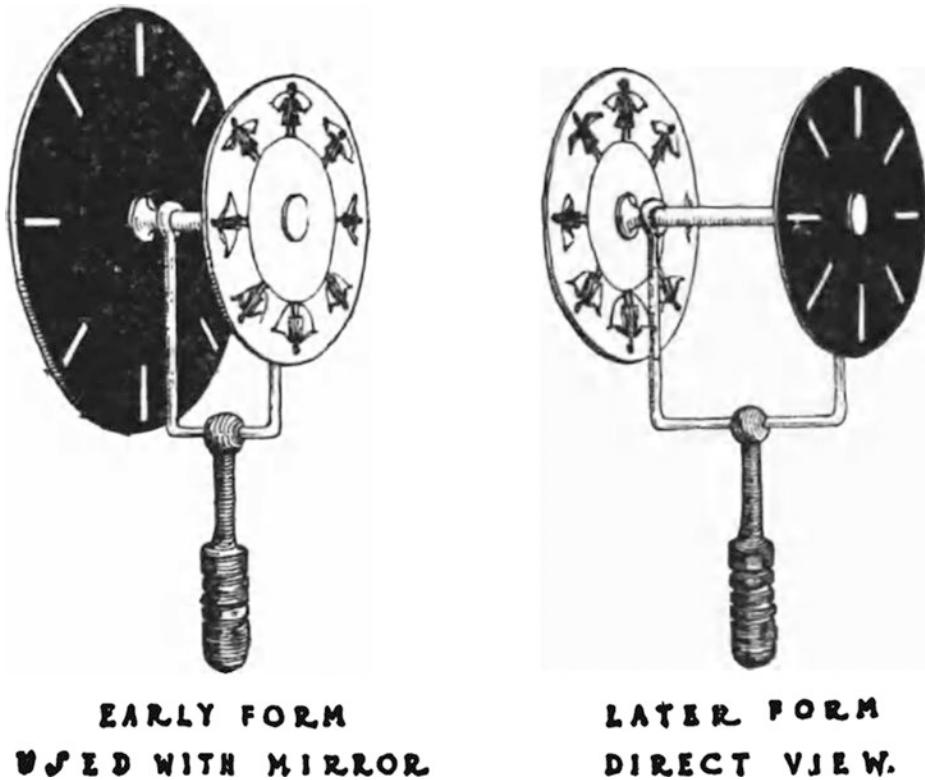


Abb. 3.42 Plateaus Phenakistiskop, Ben Lubschez (1920) aus [138], S. 15

„Die Ursache dieser Täuschungen ist sehr einfach; sie liegt darin, daß die Lichteindrücke in unserem Auge eine Weile beharren, etwa 0,2 Secunde, Wenn demnach ein Gegenstand abwechselnd so lange sichtbar bleibt, als zur Hervorbringung eines Lichteindrucks erforderlich ist, so werden wir ihn ununterbrochen zu sehen glauben, ... Es ist ferner klar, daß wir glauben werden, immer den nämlichen Gegenstand, und zwar ruhend zu sehen, wenn auch derselbe bei jedesmaliger Verdeckung durch einen anderen ihm völlig gleichen und genau an seine Stelle gebrachten ersetzt wird. Wenn aber während der aufeinanderfolgenden Verdeckungen der ursprüngliche Gegenstand successiv mit anderen vertauscht wird, ... der ... nur darin abweicht, daß er in etwas anderer Stellung oder an einem etwas anderen Ort ... gezeichnet ist, so werden wir glauben, einen und denselben Gegenstand in derjenigen Bewegung begriffen zu sehen...“

Plateau führt auf einer Sitzung der belgischen Akademie der Wissenschaften am 9. Januar 1836 eine Erfindung namens Anorthoskop vor, die eine Idee seiner Dissertation zur Entzerrung eines anamorphen (verzerrten) Bildes aufgreift (aus [140], S. 7).

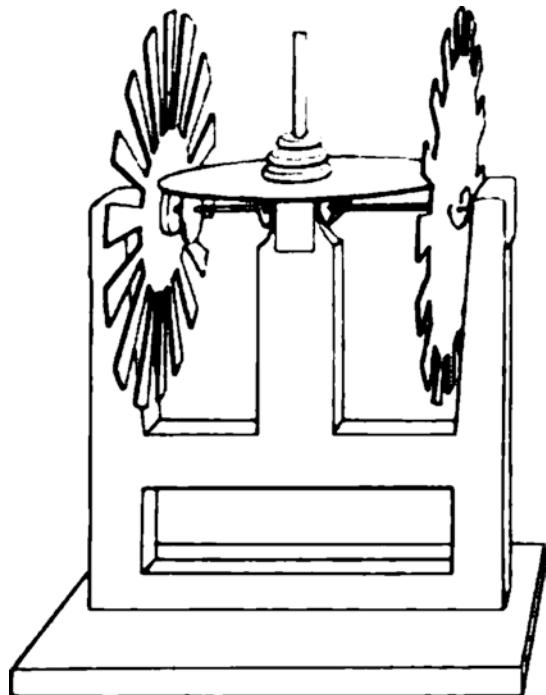
„Ich habe die Ehre, der Akademie ein Exemplar des Instruments meiner Erfindung vorzu führen, das jetzt unter dem Namen Anorthoskop veröffentlicht wird.“

Ein Anorthoskop besteht aus zwei Scheiben, die hintereinander, einzeln drehbar montiert sind. Auf der hinteren, transparenten oder durchscheinenden Scheibe ist das verzerrte Bild aufgebracht. Diese Scheibe wird von hinten beleuchtet. Vor der Bildscheibe befindet sich eine undurchsichtige Schwarze Pappscheibe mit mehreren Spalten. Dreht man die beiden Scheiben gegenläufig mit definierter Geschwindigkeit, so entsteht ein entzerrtes Bild der unförmigen Figuren (nach [141], S. 464–466). Zu dieser Vorrichtung hatte Plateau nach eigener Aussage eine Lesung zu Faradays Zahnradexperiment inspiriert. Um die von ihm beobachtete Überlagerung der Bewegung zweier gezahnter Räder an Mühlwerken oder zweier Räder mit Speichen nachzustellen, baute sich Faraday ein Gerät mit zwei einzeln beweglichen Zahnrädern (Abb. 3.43). Plateaus Anorthoskop ist dem Faradayschen Zahnradaufbau sehr ähnlich, allerdings stellt Plateau ein Bild dar.

Plateau gibt sich auf dieser Sitzung in der Folge alle Mühe, die Erfindung des bewegten Bildes für sich zu reklamieren und weist auf das von ihm bereits beschriebene „Fantascope“ bzw. „Phénakisticope hin. Ganz besonders versucht er, die frühere Priorität seines Phénakisticopes zu den stroboskopischen Scheiben von Stampfer nachzuweisen.

Etwa zur gleichen Zeit wie Plateau (1833) gelang Stampfer nämlich mit der Entwicklung der „stroboskopischen Scheiben oder optischen Zauberscheiben“ ebenfalls eine Animation [143]. Stampfer entwickelte seine Animation aus den Beobachtungen von Bewegung hinter Zäunen (nach Roget), bewegter Räder (nach Faraday) und dem

Abb. 3.43 Zahnradversuch,
Michael Faraday (1831) aus
[142] Plate 3



Thaumatrop von Paris, ohne Plateau zu erwähnen (oder zu kennen). Neben der Verfassung einer guten Beschreibung seiner gelang es Stampfer gemeinsam mit Trentsensky ein kaiserliches Privileg für die „Erfindung, Figuren und farbige Formen, überhaupt Bilder jeder Art, ... so zu zeichnen, daß, wenn dieselben mit gehöriger Schnelligkeit durch irgendeinen Mechanismus am Auge vorbeigeführt werden, ... die mannigfältigsten optischen Täuschungen in zusammenhängenden Bewegungen und Handlungen dem Auge sich darstellen...“⁵⁸ zu erhalten. Dieses Privileg verhalf den Stampferschen Scheiben unter verschiedenen Bezeichnungen und Handelsnamen⁵⁹ zu Verbreitung und Bekanntheit. Die Einfachheit der Technik und die daraus resultierende preiswerte Herstellung ließ eine Vielzahl von Variationen entstehen, die mitunter bis auf einen besonders klangvollen Namen kaum einen nennenswerten Unterschied zu der Ursprungsidee aufwiesen.

Stampfer denkt aber nicht nur in der Dimension der Scheiben, er schlägt auch andere Bildanordnungen auf einem Zylinder oder gar auf einem Papierstreifen vor (in [143], S. 11).

„Durch mehrere mechanische Verrichtungen lassen sich die Bilder einer solchen Periode so aneinander reihen, dass das letzte mit dem ersten in Verbindung kommt. Man kann nämlich die Bilder an dem Umfange einer Scheibe, oder auf der Seitenfläche eines Cylinders vertheilen, und die Scheibe oder den Cylinder um ihre Achsen drehen. Bei einer grössern Anzahl von Bildern kann man diese auf einen Streifen Papier oder Leinwand anbringen, den Anfang des Streifens mit dem Ende verbinden, diesen über zwei parallele Walzen spannen, und mittelst dieser Walzen im Umlauf setzen.“

Horner waren bei der Entwicklung seines, Dädaleums⁶⁰ genannten, Gerätes offensichtlich die Experimente von Roget, Faraday und Plateau bekannt, jedoch nicht die Idee Stampfers zur Verwendung eines Zylinders. Horner beschreibt jedenfalls die Verbesserung einer magischen Scheibe für eine bequeme Präsentation für eine größere Gruppe ([151]⁶¹ S. 651):

⁵⁸Aus Privileg Nr. 1920 in [144], S. 406–407, erteilt am 7. Mai 1833 auf zwei Jahre.

⁵⁹Z. B. stroboskopische Scheiben oder optische Zauberscheiben (Stampfer [143]), Wunderscheibe [145] oder Lebensrad, L’Ékonoscope [146], Phorolyt oder Kinesiskop (Purkinje [147], S. 62–64) Kreisdreher, Periphanoskop oder optisches Zaubertheater (Siebenmann [148], S. 272); Pantinoscope [149]; wobei damit i. d. R. sowohl Stampfers, als auch Plateaus Ph(a)enakistikope bezeichnet wurden. Als der eigentliche Erfinder des Phenakistiskops wird heute zumeist Plateau genannt.

⁶⁰Benannt nach Dädalos, einem begnadeten Künstler und Erfinder der griech. Mythologie. Er war der Vater des Ikarus (dem er auch die Flügel baute) und Erbauer des Labyrinths für den Minotaurus (aus man sich nur mit dem berühmten „roten Faden der Ariadne“ befreien konnte). Horner bezieht sich bei seiner Namensgebung aber die wandelnden Statuen des Dädalos (s. z. B. Aristoteles [150], S. 37).

⁶¹Hier in der deutschen Übersetzung der englischen „On the properties of theDædaleum, a new instrument of optical illusion“ [152].

„Der Apparat besteht bloß aus einem hohlen Cylinder, mit Oeffnungen in gleichen Abständen, und befestigt um den Rand einer rotirenden Scheibe. Alle Figuren, welche auf der Innenfläche desselben zwischen den Oeffnungen angebracht sind, werden durch die entgegengesetzten Oeffnungen sichtbar, und wenn sie von einer zur andern in stufenweis verschiedener Stellung gezeichnet sind, bieten sie dasselbe überraschende Schauspiel von relativen Bewegungen dar, welches man mit der gewöhnlichen magischen Scheibe bei Drehung derselben vor einem Spiegel erhält. Da man indes den Apparat nicht dicht vor das Auge zu halten braucht, im Gegentheil ein weiter Abstand besser ist, die Durchsichtigkeit dem Effect des rotirenden Cylinders zu Hülfe kommt, so kann die Erscheinung mit bestem Erfolg vor einer zahlreichen Versammlung gezeigt werden. Ich habe diesem Instrumente den Namen Daedaleum gegeben, da es ähnlich dem Kunstwerk, welches der berühmte Künstler des Alterthums erfunden haben soll, Gestalten von Menschen und Thieren schafft, die sich bewegen.“

Da Horner von Haus aus Mathematiker war, beschrieb er das Daedaleum anhand einer Zeichnung (Abb. 3.44) mathematisch recht umfangreich und betrachtet ausgiebig die Besonderheiten der gekrümmtem Projektion der Bilder auf den Kreis.

In Abb. 3.44 ist ein Schnitt durch den Zylinder des Dädaleums in der Draufsicht mit C als Mittel- und Drehpunkt. Der Beobachter blickt aus der Position E auf eine Öffnung A des Zylinders, die hier als innerer Kreis mit dicker Linie dargestellt wird (der äußere Kreis mit dünner Linie dient der weiteren Konstruktion). Horner leitet aus dieser einfachen Betrachtung im Zusammenhang mit der Drehung verschiedene mathematische Funktionen ab und versteigt sich dann zu dem Satz: „Hieraus erhellt [sich] die unmittelbare Relation zwischen den Cissoiden ersten und zweiten Grades.“

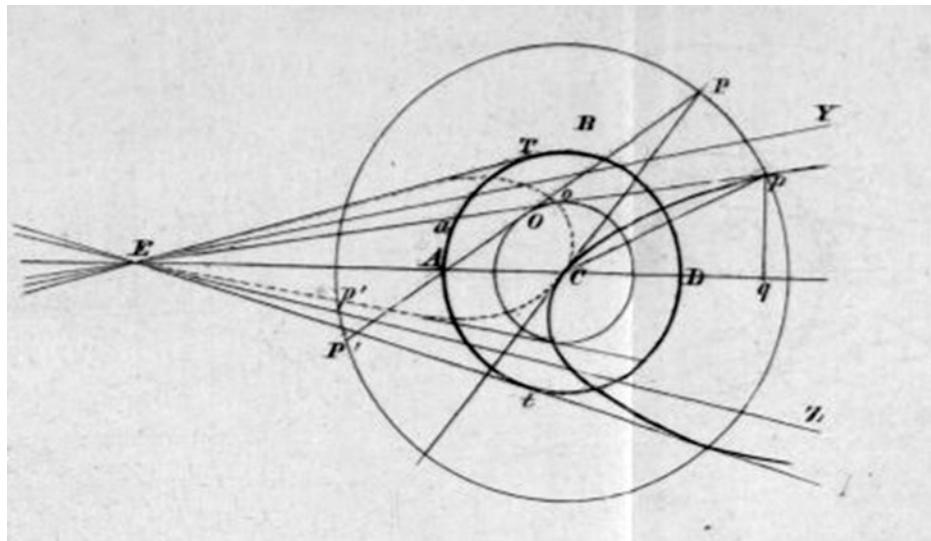


Abb. 3.44 Durchschnitt durch das Daedaleum, William Horner (1834) aus [151] Tafel V, Fig. 6

Vermutlich war Horner jedoch die Schwierigkeit der praktischen Umsetzung seiner Beschreibung selbst klargeworden, denn in der ursprünglichen englischen Ausgabe nennt er einen Vorwand für die Unzulänglichkeiten (aus [152], S. 41):

„P.S. Ich habe es nicht für nötig gehalten, eine genauere Beschreibung des Instrumentes zu geben, nachdem ich vor einigen Wochen jedes wichtige Detail einem angesehenen Optiker aus Bristol, Mr. King Jr⁶²., übermittelt hatte. Die Veröffentlichung scheint jedoch, wahrscheinlich wegen der Skizzierung der Figuren, auf einige Hindernisse gestoßen zu sein.“⁶³

Da weder Horner noch King weitere Details zu diesem Thema publizierten, stieß dann auch Horners mathematische Beschreibung auf das Hindernis der Umsetzung und Verbreitung – wahrscheinlich eben gerade wegen der fehlenden Skizzen. Und so war es zunächst Plateaus und Stampfers Phenakistiskop, welches einige Verbreitung erlangte. Plateau selbst schlug einige Verbesserungen vor, die insbesondere die Betrachtung erleichtern und den gleichzeitigen Bildeindruck für mehrere Personen ermöglichen sollten⁶⁴. Dabei verwendete Plateau zunächst die Erkenntnisse aus Anorthoskop und Phenakistiskop. Indem er zwei Scheiben mit unterschiedlicher Geschwindigkeit antrieb, konnte er definierte Verhältnisse der Umdrehungsgeschwindigkeiten zueinander schaffen. In seiner diesbezüglichen Veröffentlichung von 1850 [153]⁶⁵ geht er so detailliert auf seine Konstruktion ein, dass es wohl möglich sein sollte, das Gerät nachzubauen. Nachfolgend ist nur eine kurze Erläuterung dazu gegeben.

Die schwarze Scheibe (Schlitzscheibe) dreht sich nun in Plateaus Gerät viermal schneller, als die durchscheinende Scheibe (Bildscheibe). Auf die Bildscheibe werden in 16 gleichmäßigen Winkeln 16 verzerrte Bilder aufgebracht und mit 4 gleichmäßigen Spalten der Schlitzscheibe überlagert. Die Stelle der Bildentstehung beleuchtet Plateau von hinten mit dem gerichteten Licht einer starken Lampe, sodass nur ein kleiner, ausgewählter Teil Bildscheibe beleuchtet wird. In einem dunklen Raum sieht man dadurch nur ein einziges, sich bewegendes Bild. Diese grundlegende Anordnung mit zwei sich unterschiedlich schnell bewegenden Scheiben und selektiver Beleuchtung kann eventuell als ein erster Bildschirm bezeichnet werden.

Plateau präsentierte in seinem Aufsatz darüber hinaus zwei weitere Ideen, wie sich mit seinem Phenakistiskop noch eindrucksvollere Effekte erreichen lassen. Beide

⁶²Vermutlich John King Junior.

⁶³Eigene Übersetzg., im Original: „P.S. I have not thought it requisite to give a more particular description of the instrument, having communicated every needful part of the detail, some weeks ago, to a respect able optician of Bristol, Mr. King, jun. The publication seems, however, to have met with some impediment, probably in the sketching of the figures.“

⁶⁴Bis dahin musste man zur Betrachtung der Bilder die rotierende Scheibe dicht ans Auge halten und das andere Auge schließen.

⁶⁵Der Vortrag wurde bereits 1849 gehalten, die hier gegebene Auswertung basiert auf der deutschen Ausgabe [154].

Anregungen kommen von Wheatstone, der Plateau vorgeschlagen hatte, das Phenakistiskop mit dem Stereoskop zu koppeln. Dazu werden einfach zwei Plateausche Apparate an den beiden Seiten eines Wheatonschen Spiegelstereoskopes angebracht. Um eine größtmögliche Realitätsnähe zu erreichen, soll dazu mittels des (damals) neuen Mediums Fotografie zwei stereoskopische Bildsätze (Daguerreotypien) erstellt werden.

Es werde Licht!

Für viele Jahrhunderte waren Fackeln, Kerzen und Öllampen die hellsten künstlichen Lichtquellen. Um eine höhere Helligkeit zu erreichen, konnte man ganz einfach die Anzahl der Feuerstellen vergrößern oder durch geeignete Lichtführung mit Spiegeln und Linsen die Lichtausbeute erhöhen. Erst im Jahre 1783 Zeit verbesserte Argand⁶⁶ die Öllampe mit einem hohlem Docht für eine optimierte Sauerstoffzufuhr und zusätzlichem Glaszyylinder ([155], S. 50). 1799 wurde durch Philippe Lebon eine Lampe zum Erzeugen von Licht und Wärme aus Gas zum Patent angemeldet [157], welche später als „Thermolampe“⁶⁷ bekannt wurde.

Die Argandsche Lampe wurde wegen ihrer Einfachheit, Sparsamkeit und Helligkeit in vielen Ländern nachgebaut und ist spätestens ab 1799 auch in Deutschland nachweisbar (s. z. B. [159]). In der Beschreibung von Scherer findet sich neben der ausführlichen Beschreibung, auch eine detaillierte Zeichnung, die den Nachbau gewiss vereinfacht hatte (Abb. 3.45).

Die Argand-Lampe oder der Argand-Brenner ist der Urtypus der Öl- und Petroleumlampen des 19. Jhd. und war bis zur erfolgreichen Einführung des elektrischen Lichtes durch Edison 1880 die bevorzugte Lichtquelle in privaten Räumen. Im öffentlichen Bereich, Theatern oder bei der Straßenbeleuchtung war der Transport des Brennmaterials zum Brenner die eigentliche Herausforderung. Die Verbreitung von Gas ist im Vergleich zum Transport von Ölen deutlich einfacher, dazu durch den fehlenden Docht auch deutlich wartungsärmer. Dadurch eignet sich Gas zur Straßenbeleuchtung. Bis heute wird in Berlin etwa 10 % der öffentlichen Beleuchtung durch Gaslaternen realisiert⁶⁸.

Die Lichtstärke einer Kerze beträgt in etwa 1 Candela⁶⁹. Eine Thermo- oder Argand-Lampe um 1800 strahlte das Licht von etwa 10 Kerzen ab (nach [161], S. 44). Durch die Verwendung eines

⁶⁶Argand patentierte seine Lampe zunächst in England (Patent Nr. 1425) und später auch in Frankreich. Gleichzeitig beanspruchten auch der Apotheker Quinquet und der Destillateur Ambroise Bonaventure Lange (L'Ange) die Erfindung ([155], S. 50). Interessant ist hier die Erläuterung in einem Brief vom 13. Februar 1784 von Antoine-Alexis Cadet de Vaux (Politiker und Wissenschaftler in Paris) an Benjamin Franklin, einem der Gründerväter der Vereinigten Staaten. Darin wird die Vermutung geäußert, Quinquet und Lange hätten bei der gemeinsamen Arbeit mit Argand an Montgolfiers Heißluftballon im Herbst 1783 von Argand selbst die Details seiner Erfindung erfahren ([156], S. 563–564).

⁶⁷Die Bezeichnung Thermolampe ist eine direkte Übersetzung von Lebons Bezeichnung „thermolampes“ im Nachtrag von 1801 zu seinem Patent ([157], S. 126) ins Deutsche [158].

⁶⁸Von insgesamt ca. 224.000 Straßenleuchten wurden noch im März 2018 31.500 mit Gas betrieben [160].

⁶⁹Lat. für Kerze.

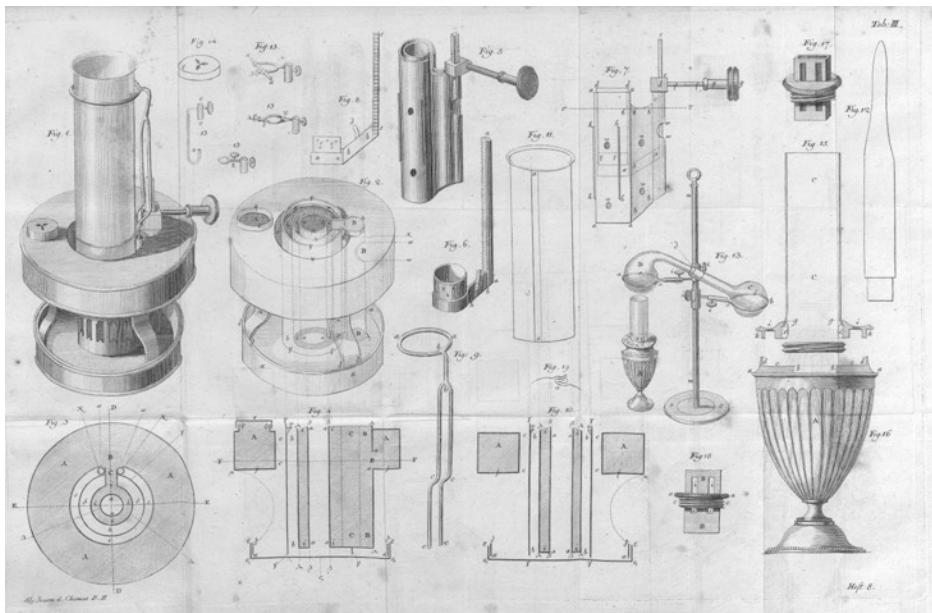


Abb. 3.45 Argand-Lampe, Alexander Nicolaus Scherer (1799)

Glühstrumpfes nach Auer⁷⁰ wurde die Helligkeit auf 70–80 Hefner-Kerzen⁷¹ (aus [163], S. 180) erhöht. Das entspricht in etwa der Helligkeit einer herkömmlichen 60 W-Glühlampe.

Noch heller war das Kalklicht von Drummond [164], der für eine Signalisierung über weite Entfernungen eine Kombination aus Gasbrenner und Parabolspiegel verwendete. Die entscheidende Verbesserung bei Drummond war aber, dass nicht die Flamme des Brenners direkt das Licht erzeugte, sondern ein Material bis zur Weißglut erhitzte. Drummond experimentierte mit unterschiedlichen Materialien und fand schließlich, dass ein glühender Kalkstein 37 mal⁷² so hell leuchtet, wie ein Argand-Brenner.

Die englische Redewendung „to be in the limelight“ (im Rampenlicht stehen) geht direkt auf Drummonds Kalklicht zurück.

⁷⁰Nach heutigem Kenntnisstand ist die Herstellung von Auer-Glühstrümpfen allerdings nicht sonderlich umweltfreundlich. Am Standort der „Glühstrumpf-Fabrik Auer von Welsbach“ in Wien (Glühstrumpf -Fertigung von 1887–1928) wurde eine Verunreinigung und Strahlenbelastung durch Pechblende, Thorium und Uran festgestellt (bis zu 17 µSv/h), die noch heute deutlich über den Grenzwerten liegen [162].

⁷¹Zur Definition der Lichtstärke wurde zum Ende des 19. Jhdts. die normierte Einheit Hefnerkerze (nach der Normalkerze des Friedrich von Hefner-Alteneck, 1845–1904) verwendet. 1 Hefnerkerze entspricht 0,903 cd.

⁷²Das wären in etwa 370 cd Lichtstärke, die durch die den Parabolspiegel noch gebündelt werden. Das Licht seiner Lampe war nach Drummonds Angaben noch in 67 Meilen Entfernung (107 km) zu sehen.

Durch die Nutzung dieser extrem hellen Beleuchtungsmittel konnten nun auch die Wunderräder zur Projektion bewegter Bilder verwendet werden, trotz der stark abdunkelnden Schlitzscheibe.

Der österreichische Artillerie-Hauptmann Uchatius hatte von Feldmarschall Hauslab die Aufgabe erhalten, das Prinzip der Stampferschen stroboskopischen Scheiben auf eine vergrößerte Darstellung an der Wand hin zu untersuchen [165].

Uchatius löste die Aufgabe, indem er einen einfachen und eleganten Projektionsapparat entwarf, den er – etwas weniger elegant – „Apparat zur Darstellung beweglicher Bilder an der Wand“ nannte [165]. Damit konnten nun auch 100 Bilder nacheinander dargestellt werden⁷³. Uchatius experimentierte zunächst mit einer üblichen Lampe⁷⁴, scheitert dann aber an der Lichtausbeute seines Apparates (aus [165], S. 483):

Der Apparat lieferte ganz nette bewegliche Bildchen, deren Grösse aber höchstens auf 6 Zoll Durchmesser gesteigert werden konnte; da bei grösserer Entfernung der Wand ..., die Bilder, der Spalten wegen zu lichtarm wurden, eine Vergrösserung der Spalten aber eine grössere Undeutlichkeit nach sich zog.

Da Uchatius erkannte, dass die Spalten selbst zu einem abgedunkelten Bild auf der Wand führen, setzte er vor jedes Bild des stillstehenden Bildrades **a** eine ortsfeste, geneigte Objektivlinse **b** (Abb. 3.46). Würde man nun alle Bilder **a** gleichzeitig von hinten beleuchten, erschienen diese gleichzeitig an der gleichen Stelle der Wand **W**. Deshalb drehte Uchatius anstelle der Scheiben die Beleuchtung (bestehend aus einem Kalkzylinder **B** und der Linse **C**)⁷⁵. Die Beleuchtung ist um den Stift **c** leicht drehbar gelagert, so dass das Beleuchtungssystem immer in aufrechter Stellung bleibt. Die Gaszuleitungsröhren **d** und **e** sind elastisch und bewegen sich durch den durchbrochenen Boden des Apparates mit jeder Kurbeldrehung auf und ab. **E** ist lediglich das Gegen gewicht, das für eine leichte Drehbarkeit sorgt.

Czermak hatte als Assistent bei Purkinje dessen als Phorolyt oder Phoroskop bezeichnetes Phenakistiskop kennengelernt und es erschien ihm 1855 wünschenswert, der Darstellung mit diesem Gerät auch die Dimension der Tiefe zu verleihen [166]. Czermaks Bestreben ist es, nicht Bewegungen plastischer Figuren darzustellen, sondern insbesondere Bewegungen in der Dimension der Tiefe zu erzeugen. Zunächst

⁷³Uchatius schlägt für 100 Bilder eine Spieldauer von $\frac{1}{2}$ min vor, damit würden nur etwa 3,3 Bilder pro Sekunde angezeigt, was keine flüssige Bewegung erlaubt.

⁷⁴Nach Fig. III in [165] (hier nicht abgebildet) wird es vermutlich eine Argandlampe gewesen sein.

⁷⁵Da durch die Gaszuleitungen Knallgas geleitet und entzündet wird, handelt es sich bei der Beleuchtung um ein Drummondsches Kalklicht.

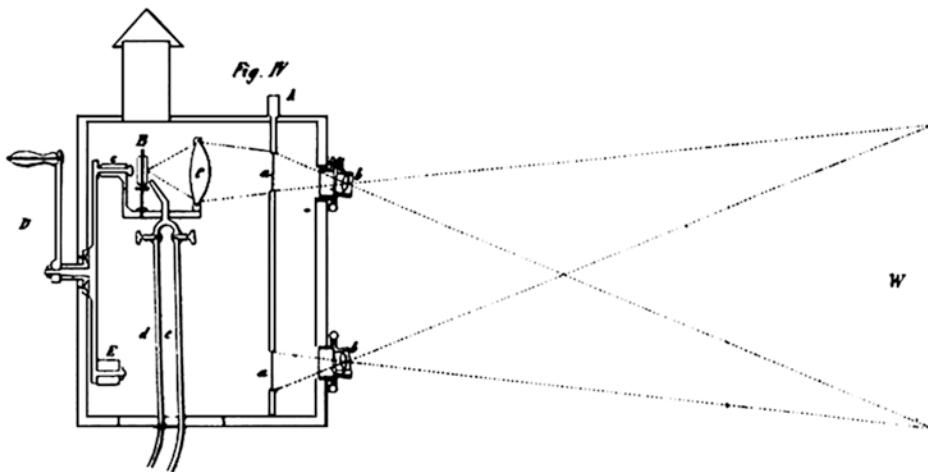


Abb. 3.46 Apparat zur Darstellung beweglicher Bilder, Franz Uchatius (1853) aus [165] Fig IV

verwendete er anstelle ebener Bilder auf der Bildscheibe körperliche Gegenstände⁷⁶. Von der Wirkung seines Experimentes ist Czermak überrascht (aus [166], S. 464):

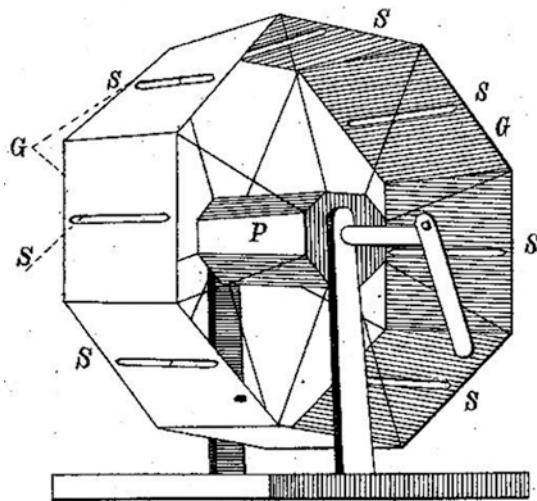
Der ganze Effect — obschon erwartet und vorausgesehen — überraschte doch, denn die Illusion war vollständig, und kaum von Wirklichkeit zu unterscheiden — es sei denn durch die Geräuschlosigkeit und Gleichmassigkeit der Bewegungen.

Er experimentierte später aber auch mit einer Verbindung von Stereoskop und Phoroskop. Czermak verwendet für seinen Aufbau die Bezeichnungen Stereophoroskop oder Stereophorolyt. Im Gegensatz zu Plateau schlägt er nicht das Wheatstonsche Spiegelstereoskop, sondern das Brewstersche Linsenstereoskop vor. Zunächst werden die stereoskopischen Bildpaare erstellt und nebeneinander auf die Seitenglächen eines mehrseitigen Prismas P geklebt. Um das innere Prisma sind in den Flächen eines umlaufenden Pappgürtels (mit der identischen Flächenzahl) horizontale Schlitze angebracht. Durch die Linsen eines Stereoskopes schaut der Betrachter nun durch die Slitze S auf das innere stereoskopische Bildpaar und erhält einen Raumeindruck (s. Abb. 3.47).

Zu bemerken ist hier, dass Czermak – ohne das er es für erwähnenswert hält – hier von der üblichen zweidimensionalen Anordnung gestapelter Scheiben eines Phenakistiskops, zu der von Plateau vorgenannten und Horner beschriebenen dreidimensionalen Anordnung eines bewegten Zylinders übergeht.

⁷⁶Czermak verwendete Stecknadeln, die er in unterschiedlicher Tiefe in die Bildscheibe des Phenakistiskops einstach.

Abb. 3.47 Stereophoroskop,
Johann Nepomuk Czermak
(1855) aus [166] Tafel III
Fig. 26



Die Zylinderform nutzt auch Lincoln⁷⁷ 1867 für ein Spielzeug, das er Zoëtrop⁷⁸ nennt [169]. Lincoln nennt oder kennt keinerlei Vorarbeiten, bis auf den Fakt, dass ein Bild auf der Netzhaut für einen Moment bestehen bleibt. Die Abbildung zeigt die Einfachheit des Gerätes, das durch eine schlichte Erläuterung im zugehörigen Text erläutert wird. Die im Vergleich zu Horners Beschreibung des Dädaleums überaus verständliche Skizze wird die eigentliche Vorlage für das Zoetrop (Abb. 3.48).

Bradley hatte 1867 in London ebenfalls ein Patent für sein Spielzeug angemeldet⁷⁹, welches er später unter dem Namen „Zoetrope“ in den Handel brachte⁸⁰.

Mit dem Phenakistiskop vergnügte sich auch der junge Maxwell ([173], S. 36). Etliche Jahre später bestellte sich der nun erwachsene Maxwell bei dem Glasgower Instrumentenmacher James White ein „Wheel of Life“ (Zoetrop) mit konkaven Linsen anstelle von Schlitten bestellt, um die Helligkeit des Lebensrades zu verbessern, wie er 1868 in einem Brief an Thomson schreibt. Die Brennweite der Linsen in Maxwells Lebensrad entspricht genau dem Durchmesser der Trommel, was dazu führt, dass die Bilder nur in der halben Größe erscheinen. Maxwell nutzt das Gerät, um Rankine-Wellen⁸¹,

⁷⁷Gemeint ist hier William Ensign Lincoln, der Sohn des Prof. John Larkin Lincoln, Brown University (nach [167], S. 997 und im Vorwort der Erinnerungen an John Larkin Lincoln [168]).

⁷⁸Von griech. zoe = Leben und trope = Drehen.

⁷⁹Patent GB No. 629 „An improved mode of and means for producing optical illusions“ (aus [170]).

⁸⁰Etliche dieser einfachen Spielzeuge [171] und Bildstreifen [172] sind bis heute erhalten geblieben (beide Beispiele aus den Penn Libraries, University of Pennsylvania), online im „Magical Motion Museum“ zu sehen.

⁸¹Nach William Rankine, der eine Schrift über die Wellenform an der Oberfläche von Ozeanen verfasste [174]. Maxwell illustriert die Wellenbewegung mit langen Pflanzen aus Seegras ([175], S. 445).

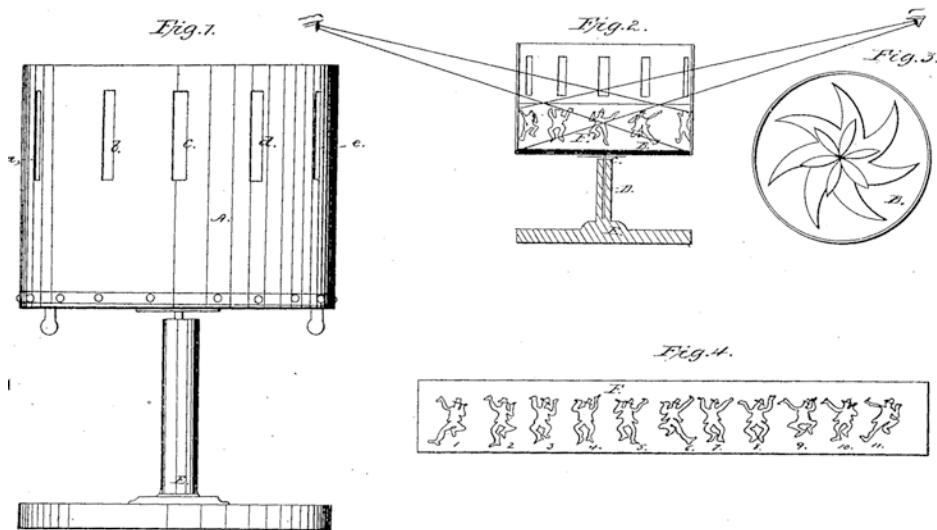


Abb. 3.48 Spielzeug namens Zoëtrop, William E. Lincoln (1867) aus [169], S. 1

Helmholtz-Ringe⁸², die 4. Figur des Lancers⁸³ und den Volvox-Globator⁸⁴ dynamisch darzustellen. Ein solches Zoetrop befand sich im Besitz von Mrs. Maxwell ([173], S. 485) und ist noch heute im Cavendish Laboratory, Cambridge zu besichtigen.

Maxwell durchdachte sogar ein binokulares Zoetrop, befürchtete aber eine große Schwierigkeit bei der Erstellung der Bilder, die er mit einem 130fachen Ärger-Verhältnis beschreibt (aus [175], S. 447):

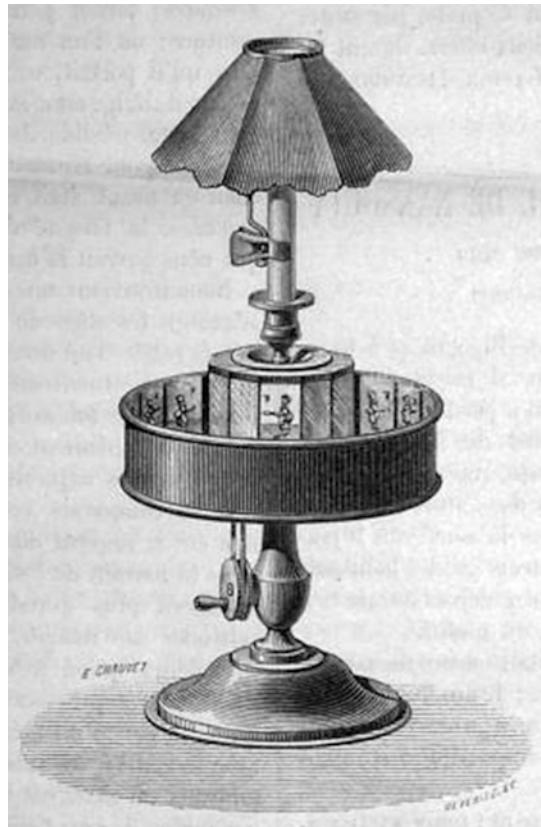
.... but the amount of care required to draw a presentable stereoscopic pair of pictures is about 10 times that required for presentable wheel of life with 13 pictures so that I estimate the ratio of trouble at $130/n$ where n is the ratio of expectation of an accurate picture in a stereoscope is same in wheel.“

⁸²Hermann von Helmholtz veröffentlichte 1858 einen Aufsatz über „Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen“ [176]. Helmholtz beschreibt darin die hydrodynamischen Gleichungen für Wirbellinien, Wirlsfäden und schließlich auch Wirbelringe bei Wasserbewegung, auf die sich Maxwell vermutlich hier bezieht.

⁸³„The Lancers“ (eigentl. „Les Lanciers“) ist eine Form des Square Dance (der Quadrille) und war zu Zeiten Maxwells in England gerade sehr populär. Die 4. Tanzfigur ist heißt nach dem deutschen Tanzmeister Trenitz „La Trénis“.

⁸⁴Volvox Globator ist eine kugelförmige, kolonienbildende Grünalge und wurde z. B. von Cohn 1856 beschrieben [177]. Maxwell illustrierte ganz passend mit dem „Wheel of Life“ das Wachstum einer Kugel bis zum finalen Platzen, um die Tochterkugeln freizugeben.

Abb. 3.49 Praxinoskop nach Reynaud, Gaston Tissandier (1879) aus [179], S. 133 Fig. 2



Eine weitere Möglichkeit, dem Zoetrop mehr Helligkeit zu verleihen, fand Reynaud 1877⁸⁵. Das Praxinoskop hat in der Mitte der Drehachse mehrere Planspiegel montiert, die den Bildern direkt gegenüberliegen. Tissandier präsentiert in seiner Beschreibung des Praxinoskops [179] dazu auch eine Zeichnung, die das Prinzip gut erklärt (Abb. 3.49).

Die Lampe in der Abbildung dient natürlich der Beleuchtung des Gerätes. Größere Bekanntheit erlangte Reynauds Praxinoskop sicherlich durch sein Projektions-Praxinoskop [179], mit dem nun auch größere Gruppen eine Präsentation gemeinsam sehen konnten. Diese Projektionsvorrichtung besteht wie ein herkömmliches Praxinoskop aus einer inneren Spiegelrad und einem äußeren Bildrad (s. Abb. 3.50). Allerdings sind die Bildflächen nun transparent und die Spiegelflächen geneigt, so dass durch geeignete Beleuchtung und Projektion auf eine Leinwand ein großformatiges Bewegtbild entsteht.

Als die erste Aufzeichnung einer realen, bewegten Szene gilt allgemein Muybridges Serienaufnahme eines Pferdes in Bewegung [180].

⁸⁵British Patent Nr. 4244 „Praxinoscope and Praxinoscope Theatre“ (nach [178], S. 238).

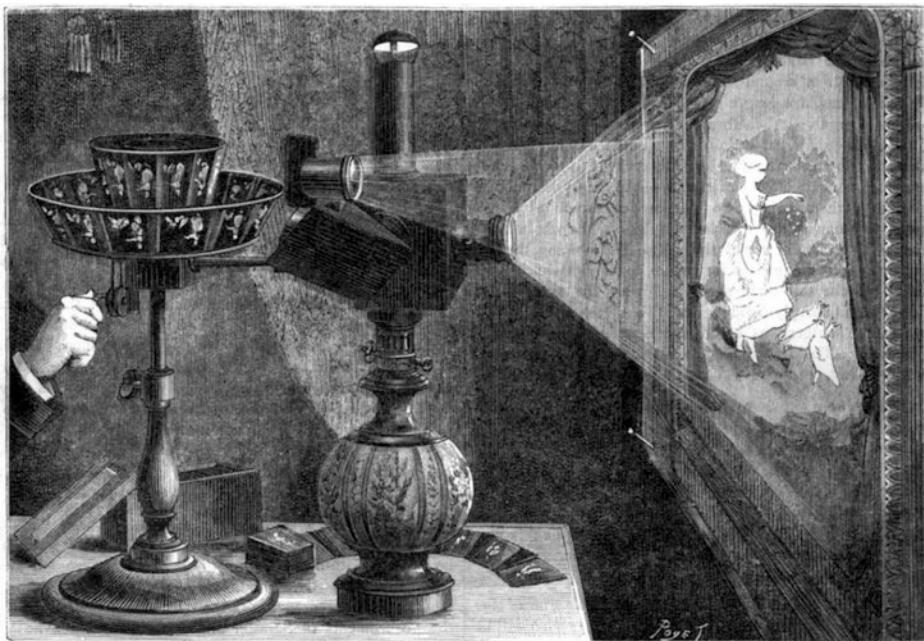


Abb. 3.50 Reynauds Projektions-Praxinoskop, Poyet (1893) aus [179], S. 61

Der französische Physiologe Marey war an der Untersuchung von Bewegung interessiert. Mareys Werk über den tierischen Mechanismus „La machine animale“ [181] lag ab 1874 auch in englischer Sprache vor [182] und enthält auch ein Kapitel über die Bewegung der Pferde. Marey bestimmte den Druck der Hufe auf dem Boden in der Bewegung und stellte fest, dass in normaler Bewegung nur zwei Hufe gleichzeitig den Boden berühren, im Galopp jedoch nur noch ein einziger. Der Unternehmer und Politiker Stanford war von den Forschungen des Franzosen Marey über die tierische Bewegung fasziniert und hatte den Fotografen Eadweard Muybridge angeheuert, um seine Pferde in Bewegung (*Animal Locomotion*) zu fotografieren. Muybridge berichtet in seiner „Beschreibenden Zoopraxiskopie“ von einer Kontroverse zwischen Leland Stanford und Frederick MacCrellish, dem Verleger des „Daily Alta California“ (bei dem zu dieser Zeit auch Mark Twain als Reisereporter angestellt war) die letztlich zu seiner Beauftragung geführt habe. Das Thema dieses Disputes war die Frage, ob es überhaupt möglich sei, dass ein Pferd während eines schnellen Galopps mitunter mit keinem Huf den Boden mehr berührt, also quasi vollständig in der Luft ist. Das ist eine Erweiterung der Untersuchung Mareys, da dieser den vollen Galopp mit seinem Apparat noch nicht studieren konnte (s. [182], S. 170). Muybridge sollte diese Frage auf fotografische Weise klären und konnte tatsächlich ein Resultat liefern: In der Abbildung Abb. 3.51 sieht man in den Einzelbildern 2 und 3 eindeutig das „fliegende“ Pferd.

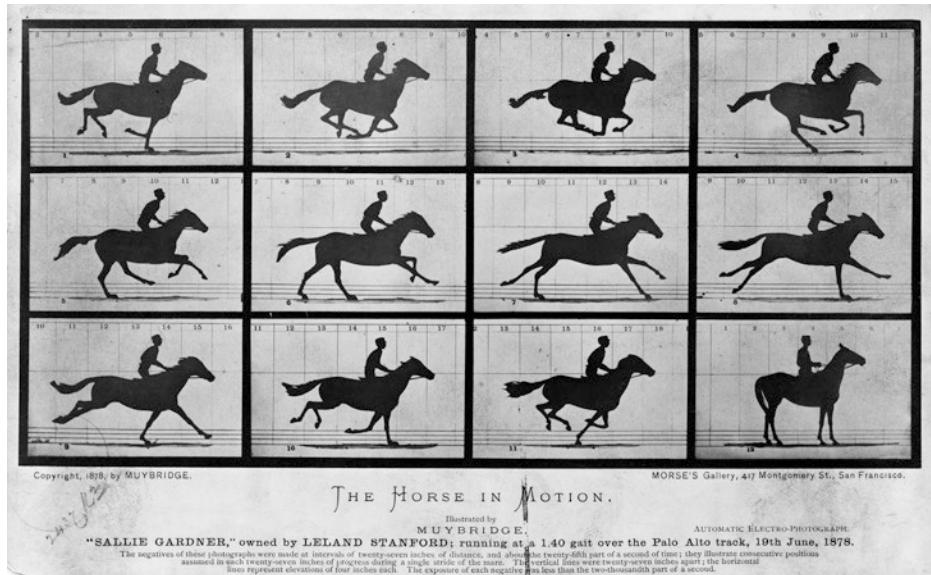


Abb. 3.51 The Horse in Motion, Eadweard Muybridge (19. Juni 1878), Library of Congress Prints and Photographs Division, Kaldari (2017), Wikimedia Commons

Derartige nacheinander folgende Aufzeichnungen mit mehreren Kameras per kontrollierter Auslösung in definierter Zeitabfolge werden auch heute unter der Bezeichnung „Freeze Frame“, „Time Slice“ oder „Frozen Moment“ als stilistisches Mittel in Kinoproduktionen verwendet. Ein bekanntes Beispiel ist die „Bullet-Time“ aus dem Film „Matrix“, in dem der Held sich in Super-Zeitlupe mit wehendem Mantel im Limbo-Style unter den Geschossen wegwindet.

Hintergrundinformation

Muybridge war ganz sicher eine unkonventionelle Figur der Zeitgeschichte. Neben seiner außergewöhnlichen Begabung für Fotografie und Technik war er auch ein überaus gewalttätiger Mann. Die Affäre seiner Frau mit einem eleganten und weitgereisten Major brachte ihn derart in Rage, dass er sich mit einem Revolver bewaffnet per Bahn und Kutsche auf den Weg zu dem Liebhaber seiner Frau aufmachte. Er rief seinem Widersacher noch zu: „Dies ist die Antwort auf den Brief an meine Frau!“⁸⁶ und schoss ihm direkt ins Herz. Erstaunlicherweise wurde er jedoch vom Vorwurf des Mordes an Major Harry Larkyns freigesprochen⁸⁷.

⁸⁶, „This is the reply to the letter you sent to my wife“ [183].

⁸⁷Die Verteidigung berief sich auf den juristischen Tatbestand der „berechtigten Tötung“. Die Begründung für den Freispruch ist aus heutiger Sicht unverständlich: „Der Ermordete hatte sich einer kriminellen Beziehung mit Muybridges Frau schuldig gemacht, und dies wurde von den Geschworenen als ausreichende Begründung für die Ermordung von Larkyns angesehen“ [184].

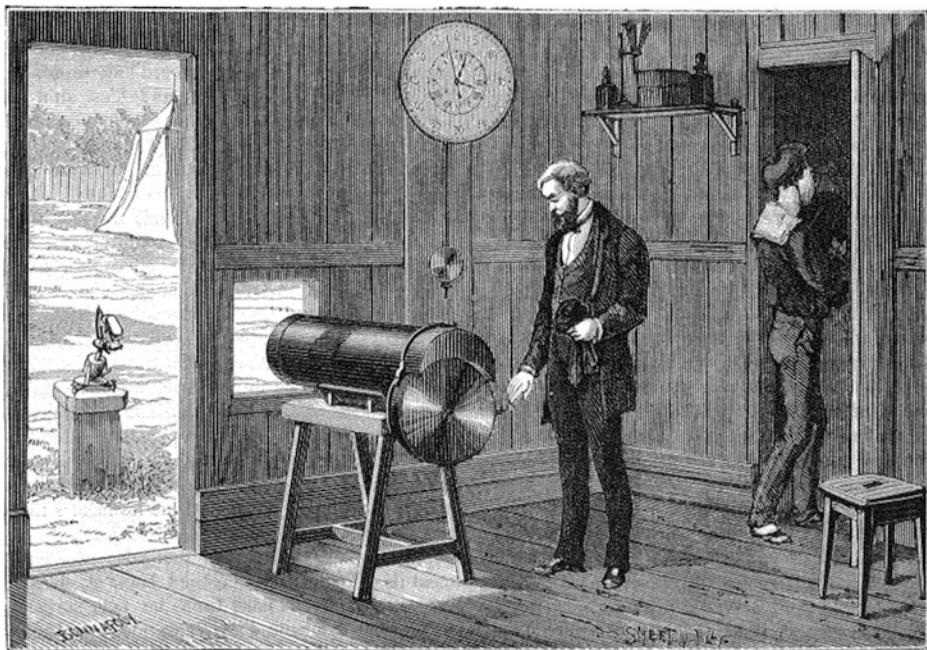


Abb. 3.52 Révolver photographique de Janssen, La Nature 101 (1875) aus [187], S. 357

In seinen Präsentationen und Publikationen verwendete Muybridge zudem gern die Darstellung nackter Männer und Frauen, was in der damaligen Zeit heftig mit den üblichen Moralvorstellungen kollidierte [185].

Auch der Berliner Anschütz machte Bilder mit kurzer Aufnahmedauer mit Momentverschluss, die man damals auf gut deutsch Augenblicksphotographie nannte [186]. Auch hier waren springende Pferde, aber auch Menschen und Tiere im Moment der Bewegung abgebildet. Mehrere zeitlich getaktete Aufnahmen nannte man Chronophotographie.

Die grundsätzliche Idee einer Mehrfachfotografie war dem Astronomen Janssen schon 1874 gekommen, als er den seltenen Venustransit⁸⁸ fotografieren wollte. Da der Vorbeizug des Planeten vor der Sonne einige Stunden andauert, hatte Janssen sich einen Revolver anfertigen lassen, der im Gegensatz zu Colts Revolver keinerlei gefährlichen Projektilen aussendete, sondern in langen Abständen eine Serie von Bildern mit langer Belichtungszeit aufnehmen konnte [187] (Abb. 3.52).

⁸⁸Das Vorbeiziehen der Venus vor der Sonne (zuletzt beobachtbar im Jahre 2012, das nächste Mal dann erst wieder im Jahre 2117).

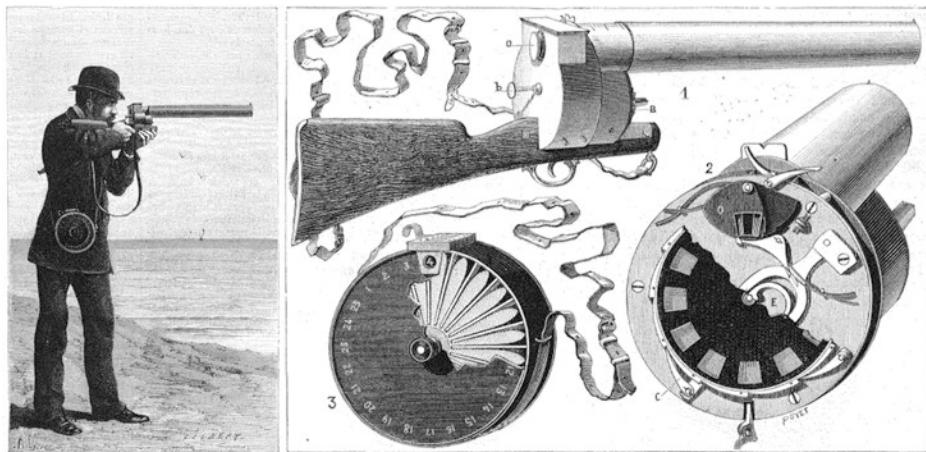


Abb. 3.53 Le Fusil photographique, Étienne-Jules Marey, La Nature 464 (1882) aus [188], S. 328, 329

Marey hatte etwas anderes im Sinn. Für seine Forschung benötigte er die Aufnahmen kürzester Belichtungszeit. So entwickelte er aus Janssens Idee einen Apparat, den er, ebenso martialisch wie Janssen, das „fotografische Gewehr“ (Fusil photographique, [188]) nannte. Wie mit einem Gewehr peilte man das sich schnell bewegende Objekt an und drückte den Abzug (Abb. 3.53). Der Apparat machte 12 Bilder in der Sekunde, wobei die Belichtungszeit für ein Einzelbild auf $1/1440$ s (also weniger als eine Millisekunde) reduziert werden konnte.

Die Abb. 3.53 zeigt deutlich die Analogien zu einem echten Gewehr. Heute bekäme man sicherlich Probleme, wenn man auf solche Art fotografische Aufnahmen im öffentlichen Raum anfertigen wollte. Marey fertigte aber auch andere Chronophotographien an, die er im Labor zu seiner Forschung der Bewegung an Mensch und Tier nutzte. Diese erinnern nun mehr an eine Kamera [189].

Mit der Chronophotographie war die Möglichkeit der Bildaufnahme bewegter Szenen entstanden, die nach einer gleichwertigen Möglichkeit zur Wiedergabe verlangte.

Muybridge erfand zur Wiedergabe der Bilder ein Zoopraxiskop, dass im Wesentlichen den stroboskopischen Effekt analog zu einem Zoetrop nutzt. Die Anordnung der Bilder erfolgte auf flachen Scheiben (ähnlich denen in Stampfers „Stroboskopischen Scheiben“ oder Plateaus „Phenakistiskop“). Muybridge projizierte das Bild der Scheiben zur Vorführung auf eine Leinwand und erzielte so eine Wirkung auch für ein größeres Publikum. Die Projektion der stroboskopischen Scheiben hatten Döbler und Uchatius schon Jahrzehnte vorher erfolgreich vorgeführt. Die maßgebliche Innovation Muybridges war die Kombination der Wiedergabe von großformatigen bewegten Bildern und der

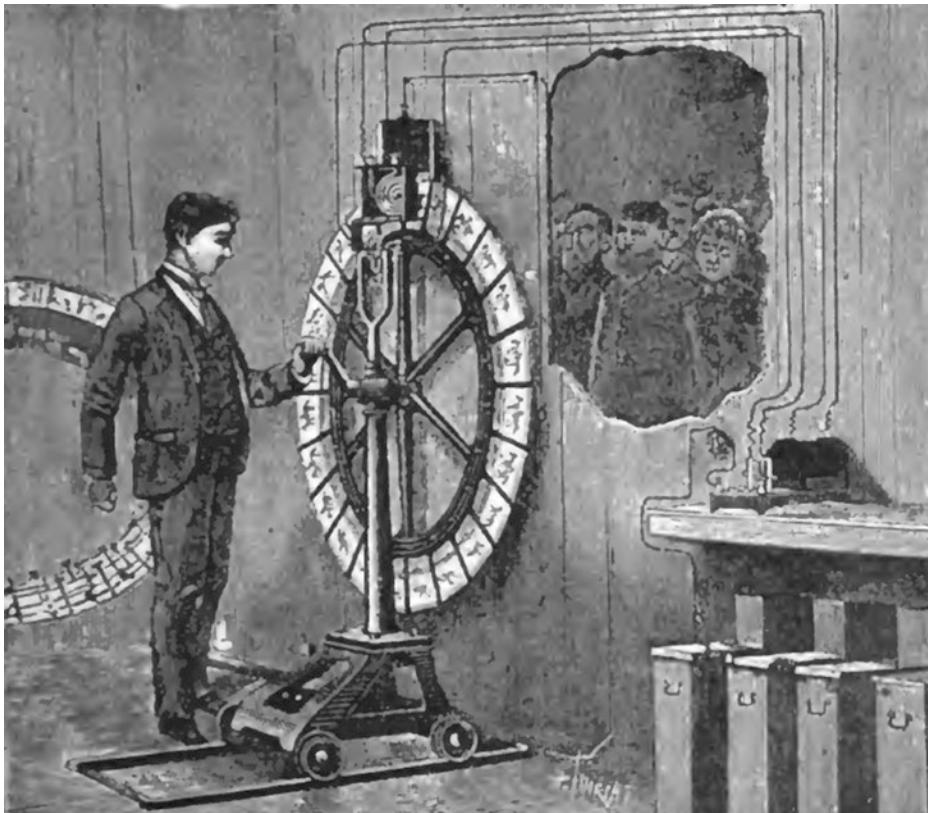


Abb. 3.54 Anschütz' elektrischer Schnellseher, Josef Maria Eder (1891) aus [192], S. 37

Aufnahme realer Szenen. Obwohl Muybridge für die Aufnahmen fotografische Platten verwendete⁸⁹, wurde durchaus schon Elektrizität während der Aufnahmen genutzt⁹⁰.

Etwas elektrischer funktioniert die Wiedergabe der Scheiben in Anschütz' elektrischem Schnellseher. Grundsätzlich wird dabei das Bildfeld einer Stroboskopscheibe von einer hellen elektrischen Lampe⁹¹ beleuchtet, was dem elektrischen Schnellseher zu seinem Namen verhilft. Drehen muss der Vorführer allerdings noch selbst (Abb. 3.54).

⁸⁹Die Aufzeichnung erfolgte auf den damals revolutionären „Dry Plates“, einer Weiterentwicklung der bis dahin üblichen Kollodium-Nassplatten in den Versionen des deutschen Auswanderers Gustav Cramer (Dry Plate Company, St. Louis) und des englischen Auswanderers John Carbutt (Keystone Dry Plate, Philadelphia). Carbutt lieferte später den ersten Celluloid-Film für das Kinetoskop von William Dickson und Thomas Edison [190, 191].

⁹⁰Muybridge benutzte als optische Verschlüsse sogenannte „Electro-Photographic Exposors“, die nacheinander über einen Elektromotor ausgelöst werden.

⁹¹Anschütz verwendet eine geißlersche Röhre (Gasentladungsröhre).

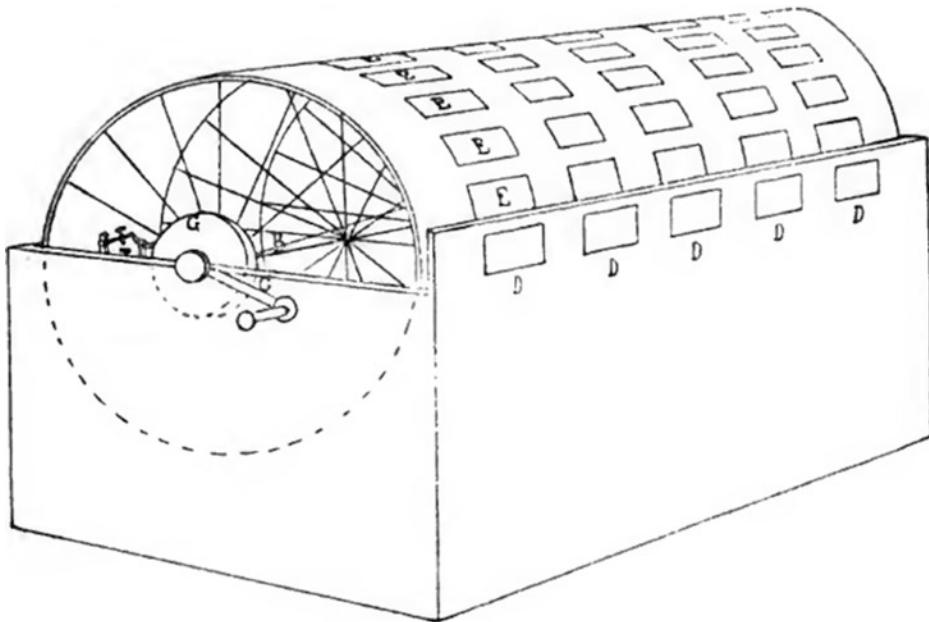


Abb. 3.55 Anschütz' Elektrotachyscop, Josef Maria Eder (1891) aus [192], S. 38

Anschütz entwickelt das Gerät zum Elektrotachyscop weiter ([192], S. 35). Jetzt ist nicht nur der Name gewaltiger, sondern die Bilder sind nunmehr auf einer Walze angebracht. Damit können mehrere Bildserien gleichzeitig nebeneinander dargestellt werden. Durch die Fenster **D** können die Bilder betrachtet werden (s. Abb. 3.55).

Von außerordentlicher Bedeutung ist bei Anschütz Elektrotachyscop der Stromunterbrecher, der die Geißlersche Röhre immer dann, wenn sich ein Bild auf der Walze genau vor dem Fenster befindet, kurz aufblitzt. Damit wird bei geeigneter Drehgeschwindigkeit⁹² ein scharfes Bild entstehen, welches ohne Blitz (bei kontinuierlicher Beleuchtung) ja in der Wahrnehmung verschwimmen würde.

Das Bild ist jedoch klein und für ein größeres Auditorium kaum geeignet. Ganz anders in Reynauds Théâtre optique. Reynaud setzte in seinem Theater ab 1889⁹³ auf Projektion. Dabei nutzte Reynaud bereits lange, für den sauberen Transport perforierte Filmstreifen, sodass auch längere Vorführungen möglich wurden (Abb. 3.56).

Anlässlich einer Präsentation in Orange, New Jersey, im Februar 1888 besuchte Muybridge auch Edisons Labor im Menlo Park und trug so möglicherweise zu der Inspiration von Dickson und Edison bei, die letztlich zur intensiven Beschäftigung der Erfinder mit dem Kinetoskop geführt haben könnte. Dickson erwähnt Mybridge in seinen

⁹²Empfohlen wurde eine Bildwiederholrate von etwa 33 Bilder pro Sekunde.

⁹³Brevet d'invention N° 194 482 „Théâtre optique“ [193].

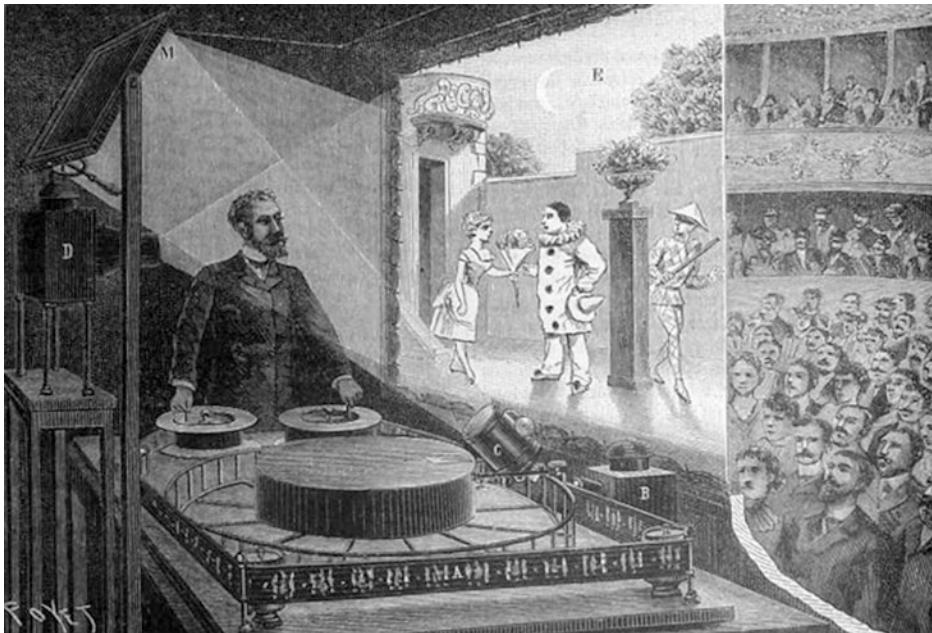


Abb. 3.56 Reynauds Théâtre optique, Louis Poyet (1893) aus [194], S. 128

Erinnerungen an Edison sogar als einen der Vorreiter, aber auch, dass Edison die Idee zu Wiedergabe bewegter Bilder schon 1887 hatte [195]. Eine Zusammenarbeit zwischen Muybridge und Edison kam jedoch nicht zustande, was durchaus an der Persönlichkeit des Mybridge gelegen haben könnte.

Edison und Dickson stellten schließlich auf der Weltausstellung 1893 das Kinetoskop vor, das im Prinzip ein Guckkasten für die Filmstreifen war. Der periodische Halt des Bildstreifens vor der Projektionslinse wird im Kinetoskop nicht durch eine geeignete Start-Stop-Automatik gelöst, sondern viel einfacher durch eine umlaufende Schlitzblende vor der Lichtquelle. Damit wurde der Stroboskopeffekt auf mechanische Art erzeugt.

Die Gebrüder Lumière hatten schließlich die richtige Idee. Sie nutzen das Reynaudsche Konzept der Projektion und übernahmen auch die Idee des Filmtransports. Im Gegensatz zu dem Konzept der Stroboskopbeleuchtung nutzten die Lumières einen periodischen Filmtransport durch eine raffinierte Start-Stop-Mechanik, durch die der Film im inneren des Kinematographen (Cinématographe) immer um einen definierten Weg weitertransportiert wurde [196, 197]. Das hatte einen erstaunlichen Nebeneffekt: Der Kinematograph konnte sowohl als Filmkamera als auch als Projektor eingesetzt werden.

Damit konnten nun auch einem größeren Publikum längere Filme präsentiert werden. Die Idee setzte sich schließlich durch und führte zum weltweiten Erfolg des Kinos. Obgleich es beständige Weiterentwicklungen gab, war die Aufzeichnung auf einem Film für lange Zeit unabdingbar. Dadurch waren Life-Übertragungen technisch unmöglich.

3.5 Fernsehen

Sehen mit Strom

Das änderte sich erst mit Entwicklung des Fernsehens. Die Entdeckung der lichtempfindlichen Eigenschaften von Selen durch Smith⁹⁴ [198], Adams und Day [199] führte zu der Möglichkeit, Licht in Elektrizität umzuwandeln. Mit der Möglichkeit, die Intensität des Lichts zu erfassen, war es nun endlich möglich, Geräte zum Sehen mit Strom („Seeing by Electricity“ [200]) zu schaffen. Da die Auflösung einer Anordnung von Selen-Empfängern eher gering war, wurde die räumliche Verteilung der empfangenen Spannungen durch eine zeitliche Verteilung ersetzt. Die Grundidee der Bildaufnahme entspricht quasi einer Single-Pixel-Kamera und lässt sich bis ins Jahr 1884 zurückverfolgen, als Nipkow seine mechanische Scanscheibe patentierte [201].

Dieses Prinzip wurde von Baird in seinem „Televisor“ [202] (s. Abb. 3.57) verwendet und von Ardenne [203] in den vollelektrischen „flying spot scanner“ umgewandelt.

Die Wiedergabe der Bilder erfolgte bei Ardenne, wie später bei ausnahmslos allen nachfolgenden kommerziellen TV-Modellen, über eine Braunsche Röhre.

Die Kathodenstrahlröhre bezeichnete man ursprünglich nach ihrem Erfinder Karl Ferdinand Braun als „Braunsche Röhre“. Braun hatte 1897 einen Apparat vorgestellt, mit dem der zeitliche Verlauf variabler Ströme auf einem Glimmerschirm zur Anzeige gebracht werden konnte [204]. Neben dieser ursprünglichen Nutzung als Oszilloskop⁹⁵ wurde die Kathodenstrahlröhre als Bildröhre für die Wiedergabe bewegter Inhalte in allen Fernsehern genutzt. Das farbige Bildraster in einer Braunschen Röhre wird grundsätzlich durch eine punkt- oder streifenförmige Verteilung der Farbphosphore (Loch-, Streifen- oder Schlitzmaske) auf der Anzeigefläche gebildet. Diese Anordnung ist fix und stellt faktisch das ideale Bildraster als Projektionsfläche des Kathodenstrahls dar. Da der Kathodenstrahl -wie Eingangs erläutert- im Prinzip nur die Abbildung eines Lichtpunktes über der Zeit ist, werden zusätzliche Informationen (mindestens Bildwiederholrate, Zeilenlänge und – zahl) benötigt, um das Bildsignal der Anzeigefläche zweidimensional zuzuordnen. Das gelingt aber kaum ideal, sodass das durch

⁹⁴Wobei Smith 1873 zunächst nur bemerkte, dass sich bei der Belichtung von Selen dessen Widerstand änderte.

⁹⁵Ein Oszilloskop macht genau das, was Braun bezweckte: Es stellt den zeitlichen Verlauf variabler Ströme (oder Spannungen) dar.



Abb. 3.57 Bairds Televisor im Londoner Science Museum (Grasnick 2017)

die Farbphosphore gebildete Anzeigeraster häufig nicht identisch mit dem durch den Kathodenstrahl gebildeten Bildraster ist. Eine direkte Adressierung und örtliche Zuordnung einzelner Anzeigepunkte ist dadurch schwierig.

Hintergrundinformation

Die präzise Abstimmung eines Röhrenmonitors an einer Grafikkarte war mitunter eine Aufgabe für Fachleute. An der Grafikkarte wurden neben Auflösung und Bildwiederholrate auch Einstellungen wie vordere oder hintere Schwarzschulter⁹⁶, Zeilensynchronimpuls oder Synchronfrequenz abgefragt. Diese Werte mussten wiederum am Röhrenmonitor mit der horizontalen und vertikalen Bildlage, Frequenz und Phase synchronisiert werden.

Eine Abweichung von den Idealwerten führte neben unschönen Bildverzerrungen auch zu Flimmern, oder Streifen, die durchs Bild liefen (wenn nicht gar das Bild selbst zu laufen begann...).

⁹⁶Beide zusammen bezeichnen die horizontale Abtastlücke und mit dem Zeilensynchronimpuls gemeinsam die Zeilenaustastlücke, im Englischen ist die Bezeichnung front bzw. back porch üblich.

3.6 Flüssige Kristalle

Möhren für die Augen

Bei Untersuchungen des Hydrocarotins in der Wurzel der Mohrrübe wollte Reinitzer im Jahre 1888 das Molekulargewicht des Cholesterins mit großer Genauigkeit bestimmen und experimentierte dafür mit Cholesterylbenzoat und -acetat. Reinitzer bestimmte die Schmelzpunkte der Substanzen und entdeckte dabei, dass die nach dem Schmelzen trübe Flüssigkeit sich bei einem weiteren Temperaturpunkt zu klären beginnt. Neben diesen beiden Schmelzpunkten bemerkte er die chromatische Polarisation und das optische Drehungsvermögen der Substrate.

Friedrich Reinitzer kontaktierte Otto Lehmann, der Reinitzers Proben nicht nur sorgfältig untersuchte, sondern in der Folge die dritte Phase zwischen Feststoff und Flüssigkeit als „flüssige Kristalle“ bezeichnete [205]. Lehmann beschrieb die Polarisationsfähigkeit des kuriosen Materials, das in der Folge auch von der Firma Merck aus Darmstadt hergestellt und vertrieben wurde (und bis heute wird).

Es ergab sich allerdings auch aus der Sicht von Merck keine kommerzielle Anwendung für die Flüssigkeitskristalle und man befindet schon 1907 [206]:

„...an diesen Artikeln, deren Darstellung kostspielig und Umsatz sehr gering ist, kann naturgemäß der Verdienst ein nur unbedeutender sein. Die Fabrikation wurde daher mehr vom Gesichtspunkte des Entgegenkommens aufgenommen.“

Dennoch waren die flüssigen Kristalle faszinierend. Der Physiker Voigt beschäftigte sich seit 1887 mit der Elastizität von Kristallen⁹⁷ und interpretierte das „krystallinische Medium“ als ein „System von Molekülen, welche durch ihre Wechselwirkungen einander im Gleichgewicht halten“ (aus [208], S. 5). Aus diesem Modell entwickelte er eine Matrix von 36⁹⁸ verschiedenen Koeffizienten, mit den sich das System beschreiben lässt. Jeder Koeffizient hat bei Voigt zwei Indizes (z. B. D_{11} , oder D_{23}) und die Symbole sind gefällig in einer Matrix angeordnet⁹⁹. Voigt hat keinerlei Schwierigkeiten, seine Mathematik der kristallinen Elastizität auch auf flüssige Kristalle auszudehnen. In seinem Lehrbuch der Kristallphysik von 1910 schreibt er „...so liegt nicht das mindeste Bedenken vor, dieselben als flüssige Kristalle oder kristallinische Flüssigkeiten zu bezeichnen.“ (aus [209], S. 17–18). Voigt nutzt zur Beschreibung der auf die Kristallmoleküle das Konzept der Tensoren.

⁹⁷Aber ebenso mit dem Einfluss von elektrischen Feldern auf die optischen Eigenschaften von Körpern (s. z. B. „Magneto- und Elektrooptik [207]).

⁹⁸Eigentlich sind es bei Voigt 81 (eine 9×9 Matrix), da aber die meisten identisch sind, existieren nur 36 unterschiedliche Werte.

⁹⁹Hieraus ergibt sich auch der doppelte Index: D_{11} wäre in Voights Notation der Wert D in Zeile 1 und Spalte 1, D_{23} demzufolge Zeile 2 und Spalte 3.

Tensoren zur „Bedeienung“ von Flüssigkristallen

Eingeführt wurde der Begriff Tensor von dem irischen Mathematiker Hamilton, der den Begriff zur Beschreibung seiner Quaternionen¹⁰⁰ nutzte (aus [210], S. 56–57)

„... wir hatten Gelegenheit, über das nachzudenken, was man als Dehnung oder Spannung bezeichnen kann, nämlich über eine andere Operation der Faktoren-Art, mit der wir von einer gegebenen Länge (und nicht von einer gegebenen Richtung) zu einer anderen übergehen.“

„... die Faktoren ... können natürlich in Übereinstimmung mit der in diesen Vorlesungen verwendeten Nomenklatur den allgemeinen Namen ‚Tensoren‘ erhalten; ...“

Voigt ist in seiner Kristallphysik einer der frühen Anwender der Tensoren und erklärt seine Intension (aus S. 132)

„Physikalische Funktionen, die zu erschöpfender Charakterisierung die Angabe eines Zahlwertes und einer zweiseitigen Richtung verlangen, nennen wir Tensoren. ... Das einfachste Beispiel, von dem auch der Name abgeleitet ist, gibt die gleichförmige Dehnung eines Körpers, z.B. eines Zylinders oder einer Kugel....“

Tensoren sind eine Vereinfachung in der Schreibweise mathematischer Gleichungen. In einem Tensor sind mehrere Einträge in einer Matrix verpackt die mehrere Dimensionen aufweisen kann. Im einfachsten Fall ist der Tensor nur ein einzelner Wert (Skalar). Ein Tensor kann aber durchaus ein Zeilen- oder Spaltenvektor oder ganz und gar eine Matrix sein. Man ersetzt in der Gleichung die Matrix mit dem Tensor und hat so eine elegantere Formel. Das wird gern in der Beschreibung von dreidimensionalen Strukturen genutzt (wie eben bei Kristallen), aber auch zur Beschreibung der vierdimensionalen Raumzeit.

Einstein machte in der regen Gebrauch von den Tensoren, zum Beispiel in der Relativitätstheorie [211] oder bei der Beschreibung der Gravitation [212]

Der Physiker Max Born versuchte das Wesen dieser „merkwürdigen Substanzen“ zu ergründen und beschäftigt sich dabei auch insbesondere mit der Doppelbrechung der flüssigen Kristalle im elektrischen Feld. Kerr hatte schon 1875 auf die Beeinflussung der Polarisierung des Lichtes beim Durchgang durch Schwefelkohlenstoff hingewiesen, wenn an den Tank eine Spannung angelegt wird [213]. Diesen Kerr-Effekt wendet Born auf die Flüssigkristalle an und stellt eine Theorie über den Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die Brechzahl auf [214]. In einem zweiten Aufsatz betrachtete Born¹⁰¹ den Einfluss der Temperatur auf die Brechzahl [215]. Der Schwede Oseen¹⁰² griff Borns Theorie auf und kritisierte unverzüglich dessen thermodynamische Betrachtungen [216]. In zwei

¹⁰⁰ Die auch eine praktische Nutzung in der 3D-Positionierung im Raum haben (s. a. Abschnitt über die Interaktion im virtuellen Raum).

¹⁰¹ Hier gemeinsam mit dem Berliner Physiker Stumpf.

¹⁰² Als Direktor des Nobel-Instituts derjenige, der Albert Einstein für den Nobelpreis vorschlug, Max Born erhielt diesen erst nach Oseens Tod.

Fortsetzungen beschrieb Oseen nun mathematisch ausführlich die Kräfte, die zwischen den Molekülen der Flüssigkristalle wirken und deren Ausrichtung beeinflussen [217, 218].

Marconi¹⁰³ hatte 1934 die Idee, eine Kerr-Zelle¹⁰⁴ mit Flüssigkristallen zu füllen und in Bild- und Videoübertragungen einzusetzen. Diese Idee erscheint äußerst praktisch, eine tatsächliche Umsetzung ist dennoch nicht bekannt geworden.

Erst im Jahre 1957 erschien dann ein Artikel von Brown und Shaw [219], der ein größeres Interesse anregte. Schon im Jahr darauf veranstaltete die Faraday-Gesellschaft in Leeds eine General-Diskussion über die „Konfigurationen und Interaktionen von Makromolekülen und Flüssigkristallen“. Einer der Teilnehmer war der britische Forscher Gray, der später dazu ein beachtenswertes Buch über die Eigenschaften der Flüssigkristalle schreiben sollte [220].

Die Theorie Oseens fand 1958 ihre Fortsetzung in einer aktuellen Überarbeitung durch Frank [221] und ist heute als Oseen-Frank-Theorie ein Bestandteil in der Auslegung aktueller Flüssigkristallbildschirme.

Vielleicht durch diese aktuellen Publikationen inspiriert, versuchte der amerikanische Physiker Fergason, die Temperatureigenschaften der Flüssigkeitskristalle zu einer thermischen Bildaufzeichnung zu nutzen. Da Fergasons Arbeitgeber Westinghouse kein Interesse an dieser Arbeit zu haben schien, wechselte Fergason zu dem 1965 von Brown an der Kent State University in Ohio gegründetem „Liquid Crystal Institute“. Das Institut startete im gleichen Jahr mit der ersten „International Liquid Crystal Conference“ An dieser Konferenz nahmen auch Georg Heilmeier und Richard Williams teil. Heilmeier und Williams waren zu dieser Zeit Mitarbeiter bei Radio Corporation of America (RCA)¹⁰⁵. Beide forschten zu dieser Zeit in den RCA Laboratories an der Nutzung der Flüssigkeitskristalle. Der Chemiker Williams kannte die Möglichkeit der Ausrichtung einer dünnen Schicht der Kristalle durch ein elektrisches Feld [222]. Sein Kollege, der Ingenieur Heilmeier, konnte diesen Effekt nun in einer ersten Flüssigkristall-Anzeige nutzen.

Der ehemalige RCA-Mitarbeiter Helfrich arbeitete mit seinem Kollegen Schadt im Basler Labor der Firma Hofmann-La Roche. Nach kurzer Zeit konnten Schadt und Helfrich aus der „Lichtsteuerzelle“ funktionstüchtige Anzeigen bauen, die dann erstmalig kommerziell von dem Elektronikkonzern Brown, Boveri & Cie genutzt zum Bau einer Digitaluhr wurden – für einen Schweizer Konzern sicherlich naheliegend. Brown, Boveri & Cie bauten die Displays in eigener Fabrik in Lenzburg, womit sich die erste Liquid-Crystal-Display-Fabrik der Welt im Schweizer Aargau befand.

¹⁰³Marconi's Wireless Telegraph Company Limited, London, gegründet von Guglielmo Marconi.

¹⁰⁴In einer Kerr-Zelle (nach John Kerr) nach wir durch Anlegen einer Spannung in einer doppelbrechenden Flüssigkeit der Polarisationszustand des durchgehenden Lichtes verändert.

¹⁰⁵RCA war einer der Pioniere der Fernsehtechnik in den USA und Entwickler vieler Standards der Bild- und Tonübertragung.

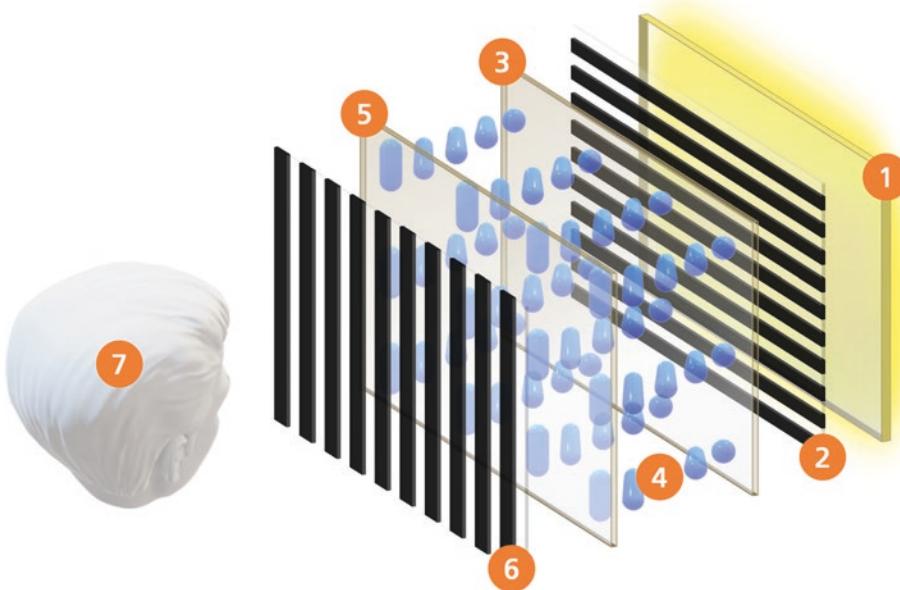


Abb. 3.58 vereinfachte Flüssigkristall-Zelle, Grasnick (2019)

Ein Liquid Crystal Display (LCD) funktioniert im einfachsten Fall so, wie in Abbildung Abb. 3.58 dargestellt. Zwischen zwei Glasplatten (3), (5) befindet sich eine Schicht von Flüssigkristall (4). Die Molekulanordnung im Kristall ist schraubenförmig verwunden. Das wird erreicht, indem die Glasplatten, an deren Oberflächen die Moleküle haften, gegeneinander um 90 Grad verdreht werden. Die Glasplatten sind mit transparentem, aber elektrisch leitenden Material¹⁰⁶ beschichtet und können so die Ausrichtung der kristallinen Flüssigkeit verändern. Vor einer Lichtquelle¹⁰⁷ (1) befindet sich ein Polarisationsfilter (2), der nur das Licht einer bestimmtem Schwingungsrichtung passieren lässt. Da die Polarisation den Schraubenwindungen der Kristallstruktur folgt wird die Polarisationsrichtung beim Durchgang durch den Flüssigkristall um 90 Grad gedreht. So kann das Licht den zweiten Polarisationsfilter (6), der nur für die vertikalen Anteile durchlässig ist, passieren. Der Beobachter (7) sieht das Licht.

¹⁰⁶Das Material ist üblicherweise Indiumzinnoxid (ITO), weshalb diese Beschichtung auch häufig „ITO-Schicht“ genannt wird.

¹⁰⁷Bei Uhren und Taschenrechnern kam auch eine einfache Reflektorfolie zum Einsatz, die das Display mit dem Umgebungslicht beleuchtete.

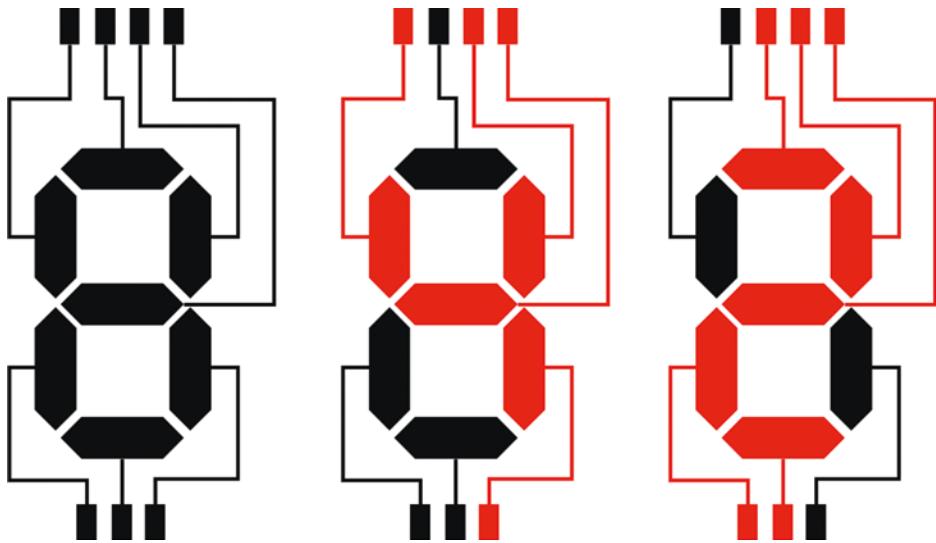


Abb. 3.59 7-Segment-Anzeige, Grasnick (2019)

Das ändert sich, sobald eine Spannung an die leitende Schicht der Glasplatten angelegt wird. Die Kristalle richten sich im elektrischen Feld so aus, dass die Polarisationsrichtung des Lichtes nun nicht mehr gedreht wird und das Licht vom Polarisationsfilter 6 blockiert wird. Wenn die Zelle im spannungslosen Zustand hell ist, wie bei einer Schadt-Helfrich-Zelle, nennt man das den „Normally-White-Mode“.

Die Wirkungsweise einer solchen Zelle beruht auf der Ausrichtung der Kristalle, die man als „hematische¹⁰⁸ Phase“ bezeichnet. Da die Kristalle im spannungslosen Zustand verdreht („twisted“) sind, spricht man in diesen Fällen von „twisted nematic“ oder TN-Displays.

In Abb. 3.58 wird die gesamte Zelle geschaltet, was für den Betrachter natürlich keinerlei Bildeindruck ergibt. Er sieht entweder ein schwarzes oder ein weißes Bild. Deshalb muss die Anzeige segmentweise geschaltet werden. Die einfachste Anzeige, wie sie auch bei den ersten Digitaluhren verwendet wurde, ist die Segmentanzeige¹⁰⁹. Ein solche Anzeige ist in Abb. 3.59 illustriert. Auf der linken Seite sind die 7 Segmente dargestellt. In der Mitte wurden 4 Segmente angeschaltet (rot), die dann eine „4“ bilden. Ganz rechts wird mit 5 Segmenten eine „2“ dargestellt.

¹⁰⁸Von griech. nema = Faden.

¹⁰⁹Segmentanzeigen wurden seit dem Beginn des 20. Jhdts. verwendet (s. z. B. 8 Segment-Anzeige von Wood [223]), das 8. Segment dient dort zum Anzeigen des schrägen Striches bei der 4.

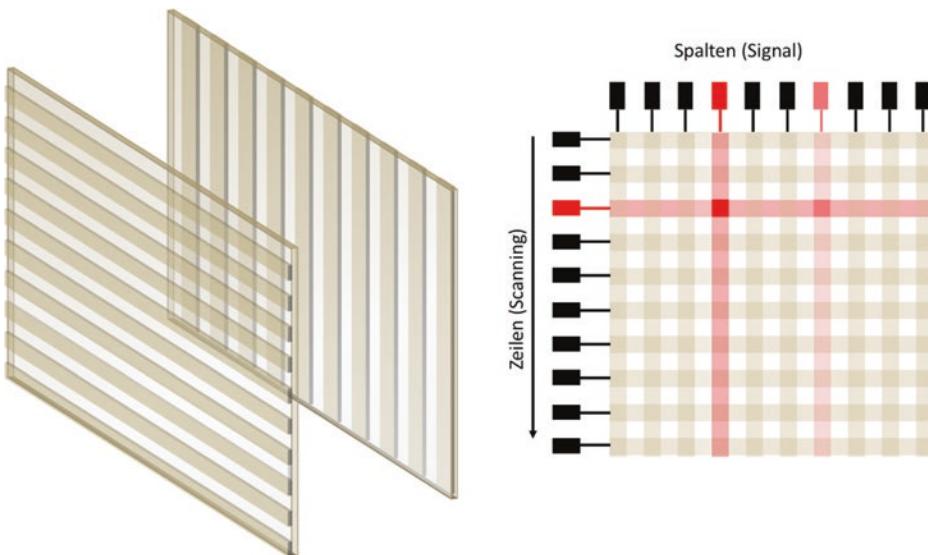


Abb. 3.60 Passiv-Matrix-Ansteuerung, Grasnick (2019)

Eine Kombination mehrerer Segmentanzeigen erlaubt die Darstellung der Uhrzeit oder die Ausgabe des Ergebnisses auf einem Taschenrechner. Der übliche Normally-White-Mode führt dazu, dass die Ziffern der Anzeige dunkel gegenüber dem Rest der Zelle erscheinen. Mit einer Segmentanzeige lassen sich jedoch bestenfalls Symbole, aber keine Bilder anzeigen. Es ist naheliegend, ein Bild über die Ansteuerung einzelner Bildpunkte zu erzeugen. Dazu wird allerdings eine große Anzahl von Bildpunkten benötigt, die man einzeln kontaktieren müsste. Bei einer 7-Segment-Anzeige ist das kein Problem, bei einem Fernsehbildschirm nach dem damaligen NTSC¹¹⁰-Standard etwa 480 Zeilen und 640 Spalten dargestellt werden, also mehr als 300.000 Bildpunkte. Heilmeier und sein RCA-Kollege Zanoni hatten daher eine Matrixsteuerung vorgeschlagen, bei dem die Spannung über vertikale und horizontale Streifen-Elektroden an bestimmte Punkte einer Matrix geführt wird [224]. Die Leiterbahnen sind auch hier durchsichtig und können einzeln geschaltet werden. An den Kreuzungspunkten zweier geschalteter Bahnen entsteht ein elektrisches Feld, das ausreichend stark ist, um die Moleküle im Flüssigkristall auszurichten. Das ist überaus verteilt, weil nun anstelle der 300.000 Einzelpunkte nur noch 480 Zeilen und 640 Spalten angesteuert werden müssten (also etwas über Tausend). Diese Art der Ansteuerung nennt man heute „passive Matrix“. Die Problematik solcher Displays liegt schon im Aufbau begründet. In Abb. 3.60 sind auf der linken Seite die horizontalen und vertikalen Leiterbahnen dargestellt. Rechts werden

¹¹⁰National Television Systems Committee, US-amerikanische Standardisierungsinstitution für das Fernsehen.

jeweils eine Spalte und eine Zeile mit Spannung versorgt. An der Kreuzung der strom-führenden Leiterbahnen entsteht das elektrische Feld (im Bild das kleine rote Quadrat). Es ist offensichtlich, dass nur ein einzelner Punkt pro Zeitpunkt mit Spannung ver-sorgt werden kann, da bei gleichzeitiger Schaltung mehrerer Spalten und Zeilen immer mehrere Kreuzungspunkte existieren würden. In der Konsequenz müssen alle anzusteuernden Kreuzungspunkte nacheinander angefahren werden. Beim schritt-weise Schalten aller Pixel nacheinander, können die gesamten Pixel des Bildschirms gemeinsam ein Bild formen. In der praktischen Umsetzung geht man zeilenweise vor. Auf alle Spalten des Bildschirms wird der jeweilige Signalpegel gegeben (in Abb. 3.60 sind zwei unterschiedliche Signalstärken illustriert). Dann gibt man auf der ent-sprechenden Zeile die Zeilenspannung hinzu und erzeugt so die gesamte Bildzeile.

Alle Zeilen werden sequenziell (nacheinander) geschaltet, sodass man auch vom Scanning spricht.

Durch die Spannung in den Leiterbahnen wird das gewünschte Feld nicht nur im Kreuzungspunkt erzeugt, sondern (unerwünscht) auch in schwächerer Ausprägung entlang der Bahnen. Um dies zu vermeiden, wird ein Flüssigkristall gewählt, der erst ab einem bestimmten Grenzwert „schaltet“. Damit wiederum hat man das Problem, dass feine Abstufungen (Grauwerte) im Display schlechter zu erzeugen sind. In der praktischen Durchführung resultiert das in einem Display mit schlechtem Kontrast.

Diese Probleme waren Motivation zur Suche nach Lösungen und schon bald hatte Lechner, ein Mitarbeiter in Heilmeiers Liquid Crystal Lab bei RCA, eine Idee. Lechner erfand das Konzept der Methode der aktiven Matrix [225]. Um die Auflösungs- oder Grauwertlimitierung eines passiven Displays zu umgehen wird jedem Pixel ein Schalter zugeordnet. An der Position des Pixels (also an jedem Kreuzungspunkt) wird ein Kondensator installiert, der die Spannung des Pixels (und damit den Grauwert) bis zum Zeitpunkt des Überschreibens (bis das nächste Bild angezeigt wird) hält. Das wichtige, funktionsbestimmende und namensgebende Element ist dabei der Dünnschichttransistor (Thin Film Transistor TFT), der in den RCA Laboratories zu dieser Zeit bereits bekannt war¹¹¹. Dieser Transistor wird nun auf einer Flüssigkristallanzeige eingesetzt. Dabei muss zunächst jeder Pixel mit Spannung versorgt werden. Dann wirkt der Transistor als Schalter und schaltet den betreffenden Pixel bei Aktivierung (durch anliegende Spannung über Zeilen- und Spaltensteuerung) zu.

Damit können kürzere Bildwiederholraten und höhere Auflösungen bei gleichzeitig größeren Kontrasten erzeugt werden. Heute lassen sich mit dieser Technologie flache Flüssigkristall-Bildschirme mit großen Bildschirmdiagonalen und hohen Auflösungen produzieren.

¹¹¹Von Weimer seit Anfang der 60er Jahre des 20. Jhd. eingesetzt [226].

3.7 Leuchtende Kristalle

Das Leuchten des Karborunds

Für besonders große Bildschirme werden als Leuchtpunkte gerne Leuchtdioden (Light Emitting Diode LED) verwendet, da diese viel höhere Helligkeit als LC-Displays¹¹² bei gleichzeitig enorm verbessertem Kontrast liefern können. Auch Leuchtdioden sind Kristalle, die aber im Gegensatz zum Flüssigkristall eine feste Form aufweisen.

Die eigentliche Funktion einer LED, also das Leuchten der Leuchtdiode, basiert auf einem Effekt, den der Marconi-Ingenieur Round 1907 beschrieben hatte. Beim Anlegen einer Spannung an einem Karborund-Kristall (Siliziumcarbid) begann dieser gelblich¹¹³ zu leuchten [227]. Round hatte seine Beobachtung nur in einer kurzen Notiz mitgeteilt, die in der Folge kaum Beachtung fand. Eine wissenschaftliche Analyse des Vorgangs führte erst Lossew durch. Lossew hatte im Nishni Nowgoroder Lenin-Radio-Labor die Karborund-Kristalle zum Leuchten gebracht und den Effekt beschrieben ([228]). Der vom französischen Physiker Destriau 1935 beobachtete Vorgang der „Elektrolumineszenz“[229] basierte auf der „Szintillation¹¹⁴“ von Zinksulfid-Kristallen durch Strom [230]. Beide Effekte sind nicht völlig identisch. Der (Round-)Lossew-Effekt beruht auf der Lichtaussendung bei Anregung von Halbleitern durch Gleichspannung. Der Destriau-Effekt basiert dagegen auf der Anregung durch Wechselspannung. Beide Effekte werden heute unter Destriaus Begriff der Elektrolumineszenz geführt.

Auf Basis dieser Effekte konnte der RCA-Physiker Braunstein nun einfache Infrarot-Leuchtdioden entwickeln, die durch Biard und Pittman von Texas Instruments in ein echtes Produkt¹¹⁵ überführt wurden [231]. Für eine Anwendung mit Bild eignen sich Infrarotdioden natürlich nicht. Für den sichtbaren Bereich entwickelte bei General Electric der Wissenschaftler Holonyak eine rote LED [232]. Mit neuen Halbleitermaterialien konnten später auch grüne oder gelbe Leuchtdioden hergestellt werden. Die Fertigung von blauen Dioden schien dagegen für lange Zeit schwierig, da das Karborund als LED-Material nur schwaches Licht erzeugte. Vielversprechender war da ein anderes Kristall, das Galliumnitrid. Dieses Halbleitermaterial ließ sich jedoch in den benötigten Größen als Einkristall einfach nicht herstellen. Ohne das blaue Licht ist aber die Erzeugung vollfarbiger Bilder unmöglich. Bei einem LC-Bildschirm ist jeder einzelne Pixel aus den Grundfarben Rot, Grün und Blau zusammengesetzt, weshalb er auch RGB-Pixel genannt wird. Die additive Mischung der einzelnen Farben ergibt jeden

¹¹²Bei Liquid Crystal Displays geht das meiste Licht der Hintergrundbeleuchtung durch die Polarisatoren verloren.

¹¹³In anderen Kristallen auch gelb, grün, orange oder blau.

¹¹⁴Szintillation bezeichnet die Lichtaussendung bestimmter Stoffe durch äußere Anregung (hier war es der Strom).

¹¹⁵Texas Instrument SNX-100 Infrarot-Diode.

gewünschten Farnton, auch Weiß. Ohne einen blauen Pixel würde die Farbdarstellung beim LCD ebenso wenig funktionieren wie bei einem LED-Bildschirm.

Die Wissenschaftler Akasaki und Amano an der japanischen Universität von Nagoya hatten sich lange mit der Herstellung von Galliumnitrid beschäftigt. Erst die Abscheidung des Kristalls auf einem Saphir-Substrat und die entsprechende Weiterverarbeitung¹¹⁶ brachte den Durchbruch und das helle blaue Licht. Unabhängig von den beiden Nagoya-Wissenschaftlern gelang es dem Elektronikingenieur Nakamura, der bei dem japanischen Chemieunternehmen Nichia angestellt war, zur gleichen Zeit die Herstellung einer blauen LED. Mit diesem technologischen Schritt, der den drei Japanern 2014 den Nobelpreis für Physik einbrachte, war die Möglichkeit zur Erzeugung vollfarbiger LED-Bildschirme in Reichweite gekommen.

Diese LEDs aus Einkristallen sind ihrem Wesen nach anorganisch, bestehen aus unbelebter Materie, also aus Stoffen, die keinen Kohlenstoff enthalten. Einkristalle sind äußerst schwierig in der Herstellung, weshalb sich immer auch der Blick in Richtung organische Materialien („belebte“ Stoffe, die Kohlenstoff enthalten) gerichtet hatte. Organische Stoffe sind das Baumaterial aller Lebewesen, leichter verfügbar und einfach herzustellen. Allerdings benötigt man ein organisches Material, das per Elektrolumineszenz Licht aussenden kann. Der Franzose Bernanose experimentierte in Nancy mit organischen Farbstoffen wie dem Acridinorange¹¹⁷ oder Quinacrin¹¹⁸, das er auf dünne Folien applizierte und einer Wechselspannung aussetzte [233]. An der New York University arbeitete ein Team um Pope an der Elektrolumineszenz in organischen Kristallen [234]. Pope hatte dem Anthracen¹¹⁹ ein Licht entlockt. Dieses Material war auch für Helfrich (noch vor seiner Zeit bei La Roche) interessant [235] und führte bei Dow Chemicals zu einer organischen Elektrolumineszenz-Zelle [236]. Die Weiterentwicklung zu einer echten lichtemittierenden Diode wird Tang und van Slyke zugeschrieben [237]. Der entscheidende Vorteil eines OLED (organische LED) gegenüber einem LCD liegt in der Selbstbeleuchtung der Pixel. Ein Liquid Crystal Display muss von außen beleuchtet werden, um ein Bild darzustellen.

Jeder Bildpixel muss über die Drehung der Polarisation hell oder dunkel geschaltet werden. Das funktioniert aber in beiden Richtungen nicht perfekt. Die Polarisatoren des LCDs blockieren bereits bis zu 75 % des von der Beleuchtung ausgehenden Lichtes. Die Farbfilter des Panels lassen jeweils wiederum jeweils nur ein Drittel des Rechtlichtes passieren, so dass letztlich noch etwa 8 % des aufgewendeten Lichtes das Auge des Betrachters

¹¹⁶Dotierung: Einbringen von Atomen eines anderen Materials (Fremdatome) zur Erzielung bestimmter elektrischer Eigenschaften.

¹¹⁷Ein Fluoreszenzfarbstoff zur Färbung von Proben in der Mikroskopie zum Nachweis von Nukleinsäuren, dem Träger der Erbinformation.

¹¹⁸Ein Medikament zur Malaria prophylaxe.

¹¹⁹Ein farbloses, mitunter weißliches Pulver, dass aus Steinkohleter gewonnen wird, auch Inhaltsstoff der Aloe-Vera-Pflanze, dient zur Herstellung von Farbstoffen.

erreichen. Die Beleuchtung hinter dem LCD muss also mehr als 10mal so hell sein, wie die Helligkeit des angezeigten Bildes. Das ist nicht sehr effektiv. Eine LED leuchtet selbst und in der gewünschten Farbe. Auf die Polarisatoren und Farbfilter kann verzichtet und so die Helligkeit der LEDs vollständig genutzt werden. Eine abgeschaltete LED ist tatsächlich dunkel, während ein abgeschalteter Pixel eines LCDs immer noch etwas Licht passieren lässt. Dadurch ist der Kontrast (das Verhältnis von höchstem zu niedrigstem Helligkeitswert) eines LCDs schon als gut zu bezeichnen, wenn er oberhalb von 1000:1 liegt. Ein echtes LED-Display kann dagegen leicht einen Kontrast von 100.000:1 liefern.

Seit der Verwendung von leuchtenden Polymeren (z. B. [238]) kann die Fertigung solcher Bildschirme effektiv sein. Der Fertigungsprozess kann ohnehin deutlich einfacher, als bei einem LCD ausfallen: OLEDs können gedruckt werden. Ein weiterer Vorteil entsteht durch den Wegfall der Polarisatoren. Bisher musste als Träger der Polarisatoren Glas verwendet werden, um den Polarisationszustand während des Durchgangs durch das Substrat nicht zu zerstören¹²⁰. Glas lässt sich ohne Erwärmung kaum biegen¹²¹, bei einem auf Folie gedrucktem OLED geht das ohne Probleme.

Grundsätzlich sind aktuelle OLED-Bildschirme üblicherweise auch als aktive Matrix aufgebaut, woraus sich die Bezeichnung AMOLED (active matrix organic light emitting diode) ableitet. Teilweise werden OLEDs wie LCDs aufgebaut, d. h. dass drei farbige LEDs (rot, grün und blau) nebeneinander (Side-by-Side) aufgebracht werden und so gemeinsam ein RGB-Pixel bilden. Interessant ist die WOLED-Technologie (white organic light emitting diode). Hierbei kommt eine weiße LED zum Einsatz, die dann über Farbfilter wieder in RGB separiert wird.

In Abb. 3.61 ist der prinzipielle Aufbau eines LC-Displays (links) dem eines LED-Displays gegenübergestellt. Während das LC-Display zusätzlich zu dem Flüssigkeitskristall noch Beleuchtung, Zeilen- und Spaltensteuerung, Polarisatoren und Farbfilter benötigt, reicht beim einem LED-Display grundsätzlich die Verteilung der farbigen LEDs und deren Ansteuerung aus.

Wie bei einem LCD, gibt es auch hier die Ansteuerung als passive oder aktive Matrix. Hinter der Bezeichnung AMOLED verbirgt sich z. B. eine aktive Matrix mit organischer LED.

Bei aktuellen Bildschirmen werden die LEDs nicht immer als Bildmatrix genutzt. Häufig wird ein LCD mit einer LED-Hintergrundbeleuchtung kombiniert. Mit dem Begriff „LED-Fernseher“ kann also auch eine Flüssigkristallanzeige gemeint sein, die lediglich vom LEDs beleuchtet wird. Diese absichtliche Fehlbezeichnung dient sicherlich vorrangig der Absatzsteigerung. Es lohnt sich aber, genauer hinzuschauen, da ein echter LED-Bildschirm tatsächliche Vorteile gegenüber einem LC-Bildschirm aufweist.

¹²⁰Wie es z. B. beim Durchgang durch ein transparentes Plastik wäre.

¹²¹Was natürlich von der Dicke des Glases abhängt: Schott hat Glas mit einer Dicke von nur 20 µm hergestellt, das auch auf Rolle geliefert wird [239].

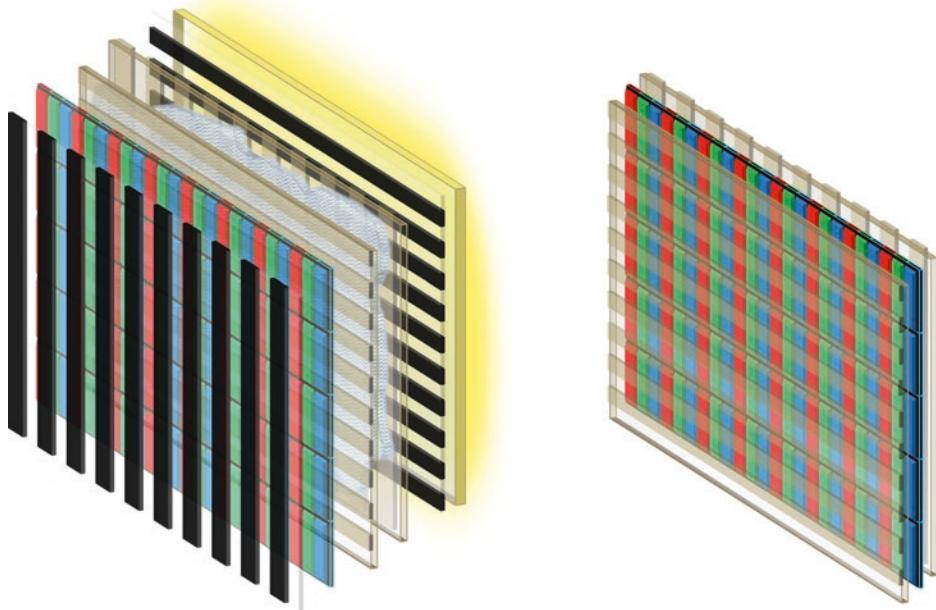


Abb. 3.61 Vergleich Aufbau LC- und LED-Display, Grasnick (2019)

3.8 Strahlendes Plasma

Licht aus geladenem Gas

Neben diesen beiden maßgeblichen Bildschirmtechniken war eine Zeitlang auch die Plasmatechnologie im Einsatz. Ebenso wie bei einer LED leuchtet auch hier jeder Pixel selbst. Der Pixel selbst besteht aus drei Kammern, die mit einem Gas¹²², gefüllt sind. Setzt man die Kammer unter Strom, wird das Gas ionisiert und damit zum namensgebenden Plasma. Dabei sendet das Plasma Licht aus, das zunächst noch für den Menschen unsichtbar ist, da es sich dabei um ultraviolette Strahlung handelt. Wie bei einer Leuchtstoffröhre sind auch die Kammern eines Plasma-Displays von innen mit einem Leuchstoff beschichtet, der die unsichtbare UV-Strahlung in sichtbares Licht umwandelt. Für jede Farbe kommt ein anderer Leuchtstoff zum Einsatz, wodurch sich auch hier wieder ein RGB-Pixel erzeugen lässt.

¹²²Hauptsächlich Neon, dazu ein paar Prozent Xenon, mitunter noch etwas Helium.

Plasma

Mit dem Begriff Plasma wird der Zustand eines Gases in einem begrenzten räumlichen Bereich bezeichnet, bei dem das Gas ionisiert und elektrisch leitend wird. Der Name geht auf eine Veröffentlichung des Amerikaners Langmuir zurück, der den Namen „Plasma“ darin nutzte, um eine Region des Gases zu beschreiben, die ausgeglichenen Ladungen von Ionen und Elektroden enthält¹²³. Langmuir hatte bei General Electric jahrelang das Verhalten ionisierter Gase studiert und dabei bemerkt, dass die Teilchengeschwindigkeiten des Gases erheblich von der eigentlich zu erwartenden Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung abweichen. In einer Niederdruck-Quecksilberdampflampe, die bei Raumtemperatur betrieben wurde, traten Teilchengeschwindigkeiten auf, die Temperaturen von 5000–60.000 °C entsprochen hätten. Langmuir vergleicht die Eigenschaften des Plasmas bei niedrigen Temperaturen mit einem Kristall und spricht von einer Art Kristallgas. Langmuir bezieht sich hier auf eine Idee von Eddington, der sich die Frage stellte, ob das stellare Gas kristallisieren würde und dabei gleichzeitig ein perfektes Gas bliebe ([241], S. 368–369).

Diese Idee hört sich noch verrückter an, als die Theorie eines flüssigen Kristalls. Plasma hat aber tatsächlich einige verrückte Eigenschaften, die es von den anderen Aggregatzuständen (fest, flüssig, gasförmig) unterscheidet und deshalb auch mitunter als der 4. Aggregatzustand der Materie bezeichnet wird. Plasma hat die Eigenschaft elektrisch zu leiten und reagiert so auch auf magnetische Einflüsse. Das Plasma kommt in der Natur nicht nur in Form von Blitzen oder Polarlichtern vor. Man geht davon aus, dass sich 99 % der Materie im Weltall im Plasmazustand befinden(s. z. B. Lehrbuch der Plasmaphysik [242], S. 2). Das interstellare Gas und alle Sterne bestehen aus Plasma. Damit wäre der Plasmazustand der übliche Aggregatzustand im Weltall und die uns bekannten Zustände fest, flüssig oder gasförmig eher die skurrile Ausnahme.

Ein Plasma gibt Energie in Form von Strahlung ab. Liegt diese im sichtbaren Bereich, leuchtet das Plasma. Bei einer Lampe oder einem Bildschirm wird das typische Plasma-Leuchten genutzt.

Plasma-Displays werden seit den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts eingesetzt. Eine frühe Anwendung war die Verwendung als Computermonitor im Projekt PLATO der Universität Illinois. Die Bezeichnung PLATO erinnert sicher nicht zufällig an den antiken Philosophen, war aber die Abkürzung für „Programmed Logic for Automated Teaching Operations“, ein System zur computerunterstützten Lehre [243]. Ein Team um den Elektronikingenieur Bitzer hatte 1966 für dieses System einen Plasmamonitor entwickelt [244] und einige Jahre später darauf ein Patent erhalten [245]. Dieses Plasma-Display war ab dem System PLATO IV in diesem Terminal enthalten [246] und auf mehreren Tausend Systemen eingesetzt. Das System war bereits grafikfähig, obgleich die Grafik noch einfärbig war (s. Abb. 3.62).

Plasmabildschirme wurden in den ersten Laptops¹²⁴ eingesetzt, aber von diesem Markt relativ zeitig durch die immer preiswerteren LC-Displays verdrängt. Der initiale Vorteil der Plasma-Displays hinsichtlich des Kontrastes und der Blickwinkel konnte bereits mit Beginn der 1990er Jahre nicht mehr mit den zunehmend verfügbaren und vollfarbigen LCDs konkurrieren. Plasmafernseher mit großen Diagonalen kamen noch

¹²³„We shall use the name plasma to describe this region containing balanced charges of ions and electrons.“ (aus [240], S. 628).

¹²⁴Z. B. im Toshiba T3200 von 1987 mit 4 Graustufen (orange) und einer Auflösung von 640 × 400 Pixeln.

Abb. 3.62 PLATO V

Terminal mit monochromem Plasma-Bildschirm von 1981,
Mtnman79 (2008), Wikimedia Commons



einmal zum Ende der 1990er auf. Hier brillierten die Plasmas gegenüber den LCs mit großen Bildschirmdiagonalen. Mit immer größeren Flüssigkristall- und Leuchtdiodendisplays verloren die Plasmageräte an Marktanteil und sind heute kaum noch im Markt zu finden.

Literatur

1. Aristoteles. Problemata Physica. 4., gegenüber der 2., durchges., unverä. Aufl. Berlin: Akademie-Verlag; 1991.
2. Ibn-al-Haiṭam AA al-Hasan A. Alhacen's theory of visual perception: a critical edition, with english translation and commentary, of the first three books of Alhacen's De aspectibus, the Medieval Latin Version of Ibn al-Haytham's Kitab al-Manazir. Philadelphia, Pa: American Philosophical Society; 2001.
3. Sabra AI. Alhazen's optics in Europe: some notes on what it said and what it did not say. In: Lefèvre W, Herausgeber. Inside the camera obscura – optics and art under the spell of the projected image. Berlin: Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte; 2007.
4. Grunmach L. Die Physikalischen Erscheinungen und Kräfte, Erkenntnis und Verwertung im praktischen Leben. Das neue Buch der Erfindungen, Gewerbe und Industrien: Rundschau auf allen Gebieten der gewerblichen Arbeit. 9. Aufl. Leipzig: Otto Spamer; 1898.

5. Bacon R. *Specula mathematica*. Frankfurt: Wolfgang Richter; 1614.
6. Bacon R, Lull R. *Von den Geheimen Wirkungen der Kunst und Natur und Richtigkeit der Magie*. Hof: Johann Gottlieb Vierling; 1776.
7. Ben Gershon L. *Milchamot Ha-schem*. Die Kämpfe Gottes. Religionsphilosophische und Kosmische Fragen. Leipzig: Carl B. Lorck; 1866.
8. Ben Gershom L. *Die Kämpfe Gottes*. Berlin: Mayer & Müller; 1914.
9. Ben Gershon L, de Alexandria P. *Instrumentum quod revelatorem secretore*. Handschrift; 1342.
10. Busard HHL. *Der Traktat De Sinibus, Chordis et Arcibus von Johannes von Gmunden*. Wien: Springer; 1971.
11. de Lineriis J. *Canon et tabulae planetarium*. Messahalla; Ptolemaeus; Almansor astrologus; Ps-Hermes; Thebit ben Corat; Johannes de Lineriis; Johannes Danck: Astronomisch-astrologische Sammelhandschrift. Frankfurt a. M.: Sammelhandschrift; 1391. S. 86r–92r.
12. de Lineriis J. *Algorismus de minutis*. Johannes de Sacrobosco; Johannes Alger; Christianus de Prachaticz; Johannes de Lineriis; Astronomisch-mathematische Sammelhandschrift. Sammelhandschrift; 1409. S. 145r–6v.
13. von Braunmühl A. *Geschichte der Trigonometrie*. Leibzig: B. G. Teubner; 1900.
14. Goldstein BR. *The astronomy of Levi ben Gerson (1288–1344)*. New York: Springer; 1985.
15. Pierer JF, Choulant L, Herausgeber. *Medizinisches Realwörterbuch zum Handgebrauch praktischer Aerzte und Wundärzte, Erste Abtheilung. Anatomie und Physiologie*. Altenburg: Literatur-Comptoir; 1825.
16. Curtze M. *Die Abhandlung des Levi ben Gerson über Trigonometrie und den Jacobsstab*. *Bibliotheca Mathematica, Zeitschrift für die Geschichte der Mathematik*. 1889;12:97–112.
17. Curtze M. *Die Dunkelkammer. Eine Untersuchung über die Vorgeschichte derselben. Himmel und Erde Illustrierte naturwissenschaftliche Monatsschrift*. 1901;13:225–236.
18. Ptolemäus C. *Amalgestum. Opus ingens ac nobile omnes Celorum motus continens*. Felicibus Astris eat in lucem. Venedig: Petrus Lichtenstein; 1515.
19. Kopernikus N. *Nicolai Copernici Torinensis De Revolutionibus Orbium coelestium, Libri VI*. Nürnberg: Petreius; 1543.
20. Kepler J. *Astronomia nova atiologetos seu physica coelestis*. Heidelberg: Gotthard Voegelin; 1609.
21. Kepler J. *Astronomia nova*. 2. Aufl. In: Caspar M, Herausgeber. München: Beck; 1990.
22. von Fabriczy C. *Filippo Brunelleschi. Sein Leben und seine Werke*. Stuttgart: Cotta'sche Buchhandlung; 1892.
23. Scott L. *Filippo di ser Brunellesco*. London: George bell and Sons; 1908.
24. Da Vinci L. *Codex Atlanticus*. 1478–1519, Handschrift, Biblioteca Ambrosiana, Mailand.
25. da Vinci L. *Pariser Manuskript D* [Internet]. Paris: Handschrift; 1508. https://www.photo.rmn.fr/CS.aspx?VP3=SearchResult&VBID=2CO5PC6HEVP_A.
26. Ravaisson-Mollien C. *Les Manuscripts de Leonard de Vinci*. Paris: A. Quantin; 1883.
27. Richter JP. *The literary works of Leonardo da Vinci*. London: Sampson Low, Marston, Searle & Rivington; 1883.
28. Da Vinci L. *The notebooks of Leonarda da Vinci*. 1955. Aufl. In: MacCurdy E, Herausgeber. Florenz, New York: George Braziller; 1955.
29. Herzfeld M. *Leonardo da Vinci: Der Denker, Forscher und Poet*. 2. Aufl. Jena: Eugen Diederichs; 1906.
30. Richter IA, Wells T, Kemp M. *Leonardo da Vinci notebooks*. New York: Oxford University Press; 2008.
31. Frisius RG. *De radio astronomico & geometrico*. Antwerpen: Bontius; 1545.
32. della Porta GB. *Magiae Naturalis Libri Viginti*. Hannover: Schleichius; 1619.

33. della Porta GB. Natural Magick in Twenty Books. In: Young T, Speed S, Herausgeber. London: R. Gaywood; 1658.
34. Dupré S. Inside the Camera Obscura: Kepler's experiment and theory of optical imagery. *Early Sci Med* 2008;13:219–44.
35. Kepler J. *Ad Vitellionem Paralipomena: Astronomiae pars Optica Traditur*. Frankfurt a. M.: Claud Marne & Johannes Aubers; 1604.
36. Kepler J. J. *Keplers Grundlagen der geometrischen Optik: (im Anschluß an die Optik des Witelo)*. von Rohr M, Herausgeber. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft; 1922.
37. Kepler J. *Dioptrice seu demonstratio eorum quae visui & visibilibus propter Conspicilla ita pridem inventa accidentunt*. Augsburg: Davidis Franci; 1611.
38. Apelles latens post tabulam, Scheiner C. *Tres Epistolae de Maculis Solaribus*. Augsburg; 1612.
39. Scheiner C. *Oculus hoc est fundamentum opticum*. Innsbruck: Daniel Agricola; 1619.
40. Kircher A. *Athanasi Kircheri ... Ars Magna Lucis Et Umbræ* [Internet]. Amsterdam: Joannem Janssonium à Waesberge, & Haeredes Elizaei Weyerstraet.; 1671. <http://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/kircher1671>.
41. Schott C. *Magia Universalis Naturae et Artis*. Frankfurt: Schönwetter; 1657.
42. Zahn J. *Oculus Artificialis Teledioptricus sive Telescopium*. Würzburg: Quirin Heyl; 1685.
43. Hooke R. *Micrographia or some physiologicale descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*. London: John Martyn & James Allestry; 1665.
44. Hooke R. *Lectures de Potentia Restitutiva, or of Spring. Explaining the power of springing bodies*. London: John Martyn; 1678.
45. Hooke R. *Philosophical experiments and observations*. London: W. Derham; 1726.
46. von Goethe JW. *Schriften zur Morphologie*. Stuttgart: Cotta'sche Buchhandlung Nachf; 1959.
47. von Goethe JW. *Briefwechsel zwischen Schiller und Goethe – Zweiter Band von Johann Wolfgang von Goethe – Text im Projekt Gutenberg* [Internet]. [zitiert 18. Februar 2018]. <http://gutenberg.spiegel.de/buch/briefwechsel-zwischen-schiller-und-goethe-zweiter-band-3683/10>.
48. Wollaston WH. *On a new metal, found in crude platina*. *Philos Trans R Soc Lond*. 1804;94:419–30.
49. Wollaston WH. *A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection*. *Philos Trans R Soc Lond*. 1802;92:365–80.
50. Wollaston WH. *Description of the camera lucida*. In: Nicholson W, Herausgeber. *Journal of natural philosophy, chemistry and the arts*. London: W. Stratford; 1807.
51. de Fontana J. *Johannes de Fontana: Bellicorum instrumentorum liber cum figuris*. Venedig: Cod.icon. 242 (Tresorhandschrift); 1420.
52. Kranz H. *Hexen, Teufel und Raketen: Technische Visionen in Johannes Fontanas „Liber instrumentorum“*. Aachen: RWTH Aachen University; 2017 S.
53. Burckhardt J. *Die Kultur der Renaissance in Italien: ein Versuch*. Nachdr. Stuttgart: Reclam; 1994.
54. Alberti LB. *La Pittura*. Venedig: Gabriel Giolito de Ferrari; 1657.
55. Tiraboschi G. *Storia della Letteratura Italiana*. Rom: Luigi Perego Salvioni Stampator Vaticano; 1783.
56. Schwenter D. *Deliciae Physico-Mathematicae. Oder Mathemat- und Philosophische Erquickstunden*. Nürnberg: Jerimias Dümler; 1636.
57. Bettini M. *Apriaria Universae Philosophiae Mathematicae*. Bologna; 1642.
58. Harsdörffer GP. *Delitiae Mathematicae et Physicae*. Nürnberg: Jeremia Dümler; 1651.
59. Kircher A. *Athanasi Kircheri ... Ars Magna Lucis Et Umbræ* [Internet]. Rom: Hermann Scheus; 1646. <http://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/kircher1671>.

60. Schott C. *Magia Optica: Geheime doch naturmässige Gesicht- und Augen Lehr.* Bamberg: Johann Arnold Cholins; 1671.
61. Martini M. *Brevis Relatio de Numero, et Qualitate Christianorum apud Sinas.* Köln: Johann Buseum; 1655.
62. Martini M, Blaeu J. *Novus Atlas Sinensis.* Amsterdam: Joan Blaeu; 1655.
63. Kohlhans JC. *Tractatus opticus.* Leipzig: Friederich Lankisch; 1663.
64. Harsdörffer GP. *Der Geschichtspiegel: Benebens XXV Aufgaben von der Spiegelkunst.* Nürnberg: Johann Anreas Endtern; 1654.
65. Vermeir K. The magic of the magic lantern (1660–1700): on analogical demonstration and the visualization of the invisible. *Br J Hist Sci.* 2005;38:127–59.
66. Kittler F. Die Laterna magica der Literatur. Schillers und Hoffmanns Medienstrategien. In: Behler E, Hörisch J, Oesterle G, Herausgeber. *Athenäum – Jahrbuch der Friedrich Schlegel-Gesellschaft.* 1994;4.
67. Liesegang FP. Das Projektionswesen. In: Hay A, von Rohr M, Herausgeber. *Handbuch der wissenschaftlichen und angewandten Photography.* Wien: Springer; 1931.
68. Eder JM. *History of photography.* New York: Columbia University Press; 1945.
69. Dechales CFM. *Cursus seu Mondus Matematicus.* Lyon: Anissoniana; 1674.
70. de Monconys B. *Voyage d'Angleterre, Pais-Bas, Allemagne, & Italie.* Lyon: Horace Boissat & Gerge Remus; 1666.
71. Huygens C. *Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens 1660–1661.* Societe Hollandaise des Sciences, Herausgeber. La Haye: Martinus Nijhoff; 1890.
72. de Monconys B. *Des Herrn de Monconys ungemeine und sehr curieuse Beschreibung Seiner ... Reisen.* Leipzig und Augsburg: Andreas Zeidler; 1697.
73. Huygens C. *Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens. Supplement a la Correspondence. Varia.*, Societe Hollandaise des Sciences, Herausgeber. La Haye: Martinus Nijhoff; 1950.
74. Huygens C. *Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens 1662–1663.* Societe Hollandaise des Sciences, Herausgeber. La Haye: Martinus Nijhoff; 1891.
75. Jacobaeus O. *Museum Regium seu Catalogus Rerum tam naturalium, quam artificialium.* Kopenhagen: Joachim Schmetgen; 1696.
76. Jacobaeus O. *Vom Museo Danico des Olinger Jacobaei.* In: Denso JD, Herausgeber. *Monatliche Beiträge zur Naturkunde.* Berlin: Verlag der Real-Schule; 1752. S. 100.
77. Huygens C. *Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens 1664–1665.* Societe Hollandaise des Sciences, Herausgeber. La Haye: Martinus Nijhoff; 1893.
78. Huygens C. *Traite de la lumiere.* Leiden: Pierre van der Aa; 1690.
79. Huygens C. *Abhandlung über das Licht.* Lommel E, Herausgeber. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1890.
80. Sturm JC. *Collegium Experimentale, Sive Curiosum.* Nürnberg: Wolfgangi Mauritii Endteri & Johannis Andreatae Endteri; 1676.
81. Leibniz GW. *Philosophischer Briefwechsel 1663–1685.* 2., neubearb. und erw. Aufl. Schneider M, Herausgeber. Berlin: Akad.-Verl; 2006.
82. Rossel D. Some thoughts on the bull's-eye lantern. *The New Magic Lantern.* 2003;9:71–5.
83. Kohlhans JC. *Neu-erfundene mathematische und optische Curiositäten.* Leipzig: Friederich Lankisch; 1677.
84. Zahn J. *Oculus Artificialis Teledioptricus sive Telescopium.* Nürnberg: Johannes Christoph Lochner; 1702.
85. Schöpf G. *Historisch-statistische Beschreibung des Hochstifts Wirzburg.* Hildburghausen: Johann Gottfried Hanisch's Wittwe; 1802.
86. Molyneux W. *Dioptrica nova: a treatise of dioptricks.* London: Benj. Tooke; 1692.

87. Locke J. An essay concerning human understanding. 4. London: Awnsham and John Churchill; 1700.
88. Project Prakash. Project Prakash [Internet]. [zitiert 1. März 2018]. <http://www.projectprakash.org/>.
89. Sinha P, Chatterjee G, Gandhi T, Kalia A. Restoring vision through “Project Prakash”: the opportunities for merging science and service. *PLoS Biol.* 2013;11:e1001741.
90. Held R, Ostrovsky Y, de Gelder B, Gandhi T, Ganesh S, Mathur U, u. a. The newly sighted fail to match seen with felt. *Nat Neurosci.* 2011;14:551–553.
91. Ehrenberger BH. *Novum et curiosum laternae magicae augmentum*. Jena: Prelo Nisiano (Nisius); 1713.
92. Sturm JC, Ehrenberger BH. *Kurtzgefasste Mathesis oder Erste Anleitung zu Mathematischen Wissenschaften*. Hildburghausen: Paul Günther Pfotenhauer; 1717.
93. Balthasar T. *Micrometria: hoc est, de micrometrorum tubis opticis, seu telescopiis & microscopiis applicandorum*. Erlangen: Daniel Michael Schmatz; 1710.
94. Ledermüller MF. *Mikroskopische Gemüths- und Augen-Ergötzung*. Nürnberg: Adam Wolfgang Winterschmidt; 1763.
95. Nicolai EA. *Gedancken von der Erzeugung des Kindes im Mutterleibe*. Halle: Lüderwaldsische Buchhandlung; 1746.
96. Ledermüller MF. *Versuch einer gründlichen Vertheidigung derer Saamenthiergen nebst einer kurzen Beschreibung derer Leeuwenhoeckischen Mikroskopien und einem Entwurf zu einer vollständigen Geschichte des Sonnenmikroskops*. Nürnberg: Georg Peter Monath; 1758.
97. Baker H. *The microscope made easy*. 2. Aufl. London: R. Dodsley; 1743.
98. Ruf O, Herausgeber. *Goethe und die Schweiz*. 1. Aufl. Hannover: Wehrhahn Verlag; 2013.
99. Baker H. *Das zum Gebrauch leicht gemachte Microscopium*. Zürich: Heidegger und Comp.; 1756.
100. von Gleichen-Rußwurm WF. *Des Herrn Baron von Gleichen genannt Russworm, Abhandlung vom Sonnenmikroskop*. Münberg: Winterschmidtsche Kunsthändlung; 1781.
101. Euler L. *Emendatio laternae magicae ac microscopii solaris. Novi Commentarii académiae scientiarum Petropolitanae* 3. Petersburg: Académie Scientarum; 1753. S. 363–380.
102. Euler L. *Briefe an eine deutsche Prinzessin über verschiedene Gegenstände aus der Physik un Philosophie. Aus dem Französischen übersetzt*. 2. Aufl. Leipzig: Johann Friedrich Junius; 1780.
103. Schirmer, S. *Sketch of the performances and short account of the origin, history and explanation of the Ergascopia, Phantasmagoria, Pantascopia, Mesoscopia, &c. and the invisible girl*. London: Large Theatre LYCEUM; 1805.
104. Tlantlaquatlapati, Sebastian, H. Herausgeber. *Chronic von Berlin – oder Berlinsche Merkwürdigkeiten*. Berlin: Petit und Schöne; 1790.
105. Wright WC. *The portfolio comprising the flowers of literature*. London: William Charlton Wright; 1825.
106. o. V. Society for the diffusion of useful knowledge. *Portable diorama – dissolving views. The Penny Magazine*. 1843;2–3.
107. Limbird J. *Dissolving views. The Mirror of Literature, Amusement, and Instruction*. 1842;1:97–101.
108. Nichols and Son, Herausgeber. *The repertory of arts and manufacturer*. London: Nichols and Son; 1802.
109. Robertson EG. *Mémoires de Récréatifs Scientifiques et Anegdotiques*. Paris: La Librairie de Wurtz; 1833.
110. Robertson EG. *Mémoires de Récréatifs Scientifiques et Anegdotiques*. Paris: La Librairie de Wurtz; 1831.

111. Bulletin des Lois de la République. Paris: Imprimerie de la République; 1799.
112. Testu, Herausgeber. Calendrier Republicain, Décrété par la Convention Nationale, pour la IIe année de la République Françoise. Paris: Testu, Imprimeur- Libraire; 1792.
113. Neue Buchhandlung und Buchdruckerei, Herausgeber. Kalender zum Gebrauche der vier neuen Departemente auf dem linken Rheinufer. Koblenz: Neue Buchhandlung und Buchdruckerei auf dem Paradenplatze; 1798.
114. Brewster D. Letters on natural magic. London: John Murray; 1834.
115. Robertson EG. Allgemeine Zeitung. 213. Aufl. Stuttgart; 1. August 1803;852.
116. Gilbert LW. Ueber die Luftfahrten der Bürger Garerin und Robertson. Ann Phys. 1804;16:257–92.
117. Vaterländische Notizen. Hamburg und Altona. II:254.
118. Österreichische Akademie der Wissenschaften. Döbler, Ludwig (1801–1864), Zauberkünstler. 2. überarbeitete Aufl., online. Österreichisches Biographisches Lexikon ab 1815. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften; 2016.
119. Vogl JNep, Herausgeber. K. K. priv. Theater in der Josephstadt: Hrn. Döbler's „Optische Vorstellungen“ in drei Abtheilungen. Oesterreichisches Morgenblatt. 1847;12:30.
120. Sturm M. Sammlung von Theaterzetteln. Königliches Hof- und National-Theater München; 1845.
121. Pfundheller J. Skizzen aus Döbler's Reise-Erinnerungen. Oesterreichisches Morgenblatt. 1847;12:74.
122. o. V. from The Spectator. The Patent Ghost. The Mercury Hobart, Tasmanien, Australien; 21. Juli 1863;3.
123. Dircks H. The Ghost! as produced in the spectre drama. London: E. and F. N. Spon; 1863.
124. Pepper JH. The true history of the ghost and all about metempsychosis. London: Cassell & Company; 1890.
125. SPIEGEL ONLINE. Grammy Awards 2006: U2 Wins Big as Mariah Doesn't – Photo 3 – International [Internet]. Madonna (L) performs from behind a holographic screen with a holographic Gorillaz performer. 2006 [zitiert 22. August 2019]. <https://www.spiegel.de/fotostrecke/grammy-awards-2006-u2-wins-big-as-mariah-doesn-t-fotostrecke-12475-3.html>.
126. Azéma M, Rivière F. Animation in Palaeolithic art: a pre-echo of cinema. Antiquity. 2012;86:316–24.
127. Claudet A. A new fact relating to binocular vision. Proc Roy Soc London. 1866;15:424–9.
128. Herschel W. Experiments on the solar, and on the terrestrial rays that occasion heat; with a comparative view of the laws to which light and heat, or rather the rays which occasion them, are subject, in order to determine whether they are the same, or different. Part I. By William Herschel, LL. D. F. R. S. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1800;90:293–326.
129. Paris JA. Philosophy in sport. London: Sherwood, Gilbert & Piper; 1827.
130. Paris JA. Philosophy in sport. London: Sherwood, Gilbert & Piper; 1833.
131. Babbage C. Passages from the life of a philosopher. London: Longman, Roberts & Green; 1864.
132. Roget PM. Erklärung eines optischen Betruges bei Betrachtung der Speichen eines Rades durch vertikale Öffnungen. Poggendorff JC, Herausgeber. Analen der Physik. 1825;81:93–104.
133. Faraday M. Über optische Täuschungen besonderer Art. Baumgartner A, von Ettingshausen A, Herausgeber. zeitschrift für Physik und Mathematik. 1832;10:80–101.
134. Wheatstone C. Description of the kaleidophone, or phonic kaleidoscope; a new philosophical ty. Q J Sci Lit Art . 1827;344–351.
135. d'Arcy P. Sur la durée de la sensation de la vue. Histoire de l'Académie Royale des Sciences. Paris: L'Imprimerie Royale; 1768. S. 18–22.

136. Plateau J. Des illusions sur lesquelles se fonde le petit appareil appelé récemment Phénakistiscope. Annales de Chimie et de Physique. Paris: Chez Crochard; 1833.
137. Julia-Fontenelle J-S-E, Herausgeber. Manuel de physique amusante, ou, Nouvelles récréations physiques. Paris: Roret; 1829.
138. Lubschez BJ. The story of motion picture 65 B.C. to 1920 A.D. New York: Reeland Publishing; 1920.
139. Poggendorff JC, Herausgeber. Annalen der Physik und Chemie. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1834.
140. Plateau J. Notice suivante sur l'anorthoscope. Bulletins l'Academie Royale des Sciences. Brüssel: M. Hayez; 1836. S. 7.
141. Poggendorff JC, Herausgeber. Annalen der Physik und Chemie. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1836.
142. Faraday M. On a peculiar class of optical deceptions. Journal of the royal institution of Great Britain. London: John Murray; 1831.
143. Stampfer S. Die Stroboscopischen Scheiben oder optischen Zauberscheiben. Wien: Trensenksy & Vieweg; 1833.
144. Precht JJ. Verzeichnis der in der österreichischen Monarchie in den Jahren 1833, 1834 und 1835 auf Erfindungen Entdeckungen und Verbesserungen ertheilten Privilegien oder Patente. Jahrbücher des kaiserlichen königlichen polytechnischen Institustes in Wien. Wien: Carl Gerold; 1837.
145. Grützner P. Einige Versuche mit der Wunderscheibe. Pflüger, Archiv für die Gesammte Physiologie des Menschen und der Thiere. 1893;55:508–20.
146. Pellerin & Cie. L'ekonoscope. Lithografie Le batonniste. 1868.
147. Purkinje JE. Apparat zur graphischen Darstellung von Bewegungen (Bericht über die Tätigkeit der naturwissenschaftlichen Section). Uebersicht der Arbeiten und Veränderungen der schlesischen Gesellschaft für vaterländische Kultur im Jahre 1841. Breslau: Graß, Barth und Comp.; 1842. S. 62–64.
148. Siebenmann RS, Leuppi JR. Das Periphanoskop oder optische Zaubertheater. Schweizer Bote. No. 35. Aarau; 29. August 1833;272.
149. Journal des Demoiselles. Pantinoscope. 1860.
150. Aristoteles. Aristoteles über die Seele. Aus dem Griechischen übersetzt und mit Anmerkungen begleitet. Frankfurt: Johann Herrl; 1794.
151. Horner WG. Ueber die Eigenschaften des Daedaleums, eines neuen auf optischer Täuschung beruhenden Instruments. In: Poggendorff JC, Herausgeber. Annalen der Physik und Chemie. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1834. S. 650–661.
152. Horner WG. On the properties of theDædalem, a new instrument of optical illusion. Lond, Edinb, Dublin Philos Mag J Sci. 1834;4:36–41.
153. Plateau J. Troisième note sur de nouvelles applications curieuses de la persistance des impressions de la rétine. Bulletins de l'Academie Royale des Sciences. 1850. S. 30–39.
154. Plateau J. Dritte Notiz über neue sonderbare Anwendungen des Verweilens der Eindrücke auf die Netzhaut. In: Poggendorff JC, Herausgeber. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1850.
155. Gehler JST. Physikalisches Wörterbuch. Leipzig: E. B. Schwickert; 1831.
156. Franklin B, Labaree LW, Willcox WB, Oberg B. The papers of Benjamin Franklin. New Haven: Yale University Press; 1959.
157. Lebon AM. 28 Spetembre 1799, Brevet d'Invention „Pour de nouveaux moyens d'employer les combustibles plus utilement, soit pour la chaleur, soit pour la lumière, et d'en recueillir les divers produits“. Description des Machines et Procédés spécifiés dans les Brevets d'Invention. Paris: Madame Huzard; 1823. S. 123–133.

158. Lebon P. Nachricht von einer ganz neuen, außerordentlichen, vom Pariser Mational-Institut geprüften, und durch ein Erfindungs-Patent authorisren Entdeckung einer Thermo-Lampe oder eines Spar-Ofens. Paris, Stadtamhof: J. M. Daisenberger'sche Buchhandlung; 1802.
159. Scherer AN. Beschreibung einer Lampen – Vorrichtung zu chemischen Versuchen. Allgemeines Journal der Chemie. Leipzig: Breitkopf und Härtel; 1799. S. 134–145.
160. Senatsverwaltung Berlin für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz. Gasbeleuchtung in Berlin/Land Berlin [Internet]. Öffentliche Beleuchtung in Berlin. 2018 [zitiert 1. April 2018]. <http://www.berlin.de/senuvk/bauen/beleuchtung/de/gaslicht/>.
161. Notizen über Frankenstein's Lunar- und Solarlicht für Weingeist-. Oel- und Gasbeleuchtung. Gratz: J. A. Kienreich; 1847.
162. Umweltbundesamt Österreich. Altstandort „Glühstrumpf-Fabrik Auer von Welsbach“ Gefährdungsabschätzung. 2017.
163. Wilke A. Die Elektrizität, ihre Erzeugung und ihre Anwendung in Industrie und Gewerbe. Berlin: Springer; 1914.
164. Drummond T. On the means of facilitating the observation of distant stations in geodaetical operations. Philos Trans R Soc Lond. 1826;116:324–37.
165. Uchatius F. Apparat zur Darstellung beweglicher Bilder an der Wand. Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei; 1853. S. 482–485.
166. Czermak, JN. Physiologische Studien. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse 15. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei; 1855. S. 425–521.
167. Cutter WR. New England families. New York: Lewis Historical Publishing Company; 1914.
168. Lincoln WE. In Memoriam John Larkin Lincoln 1817–1891. Cambridge: University Press; 1894.
169. Lincoln WE. Toy called Zoëtrop. Patent, US 64,117 Apr 23, 1867.
170. Woodcraft B. Patents applied for and patents granted for the year 1867. London: Office of the Commissioners of Patents for Inventions; 1869.
171. Bradley M. Zoetrope, 5 component pieces, by Milton Bradley. [Internet]. 1870. <http://hdl.library.upenn.edu/1017/d/archives/20080204001>.
172. Bradley M. Zoetrope, keep the ball rolling strip [Internet]. <http://hdl.library.upenn.edu/1017/d/archives/20110304011>.
173. Campbell L, Garnett W. The life of James Clerk Maxwell. London: MacMillan and Co.; 1882.
174. Rankine WJM. On the exact form of waves near the surface of deep water. Philosophical transactions of the royal society of London. London: Royal Society; 1863. S. 127–138.
175. Harman PM, Herausgeber. The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell 1862–1873. Cambridge: University press; 1995.
176. v. Helmholtz H. Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen. J Reine Angew Math. 1858;55:25–55.
177. Cohn F. Über die Organisation und Entwicklung von Volvox Globator. Amtlicher Bericht über die 32 Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte. Wien: K. K. Hof- und Staatsdruckerei; 1858. S. 162–163.
178. Hopwood HV. Living pictures. London: Optician and Photographic Trade Review; 1899.
179. Tissandier G. Le Praxinoscope. La Nature – Revue des sciences. 1879;133–134.
180. Muybridge, E. The attitudes of animals in motion, illustrated with the Zoopraxiscope. Royal institution of Great Britain; 1882.
181. Marey E-J. La machine animale – Locomotion terrestre et aérienne. Paris: Librairie Germer Baillière; 1873.

182. Marey E-J. *Animal mechanism: A treatise on terrestrial and aerial locomotion*. New York: D. Appleton and Company; 1874.
183. State Telegraph. Fatal shooting affray near Callistoga. *Sacramento Daily Union*. 48/7345. Sacramento; 19. Oktober 1875.
184. Russian River Flag. The late murder case. *Daily Alta California*. 27/9083. San Francisco; 14. Februar 1875.
185. Herbert S. Projecting the living image. *Eadweard Muybridge: The Kingston Museum Bequest*. East Sussex: The Projection Box; 2004. S. 107–53.
186. Voß G. *Die Augenblicksphotographie*. Pecht F, Herausgeber. *Die Kunst für alle: Malerei, Plastik, Graphik, Architektur*. 1889;4:148–151.
187. Flammarion C. *Le passage de Vénus*. *La Nature – Revue des sciences*. 1875;356–358.
188. Marey E-J. *Le Fusil photographique*. *La Nature – Revue des sciences*. 1882;326–330.
189. Marey E-J. *Movement*. London: William Heinemann; 1895.
190. Ramsaye T. *A million and one nights: The history of the motion picture*. New York: Simon & Schuster; 1926.
191. McCosker MJ. Philadelphia and the genesis of the motion picture. *Pennsylvania Magazine of History and Biography*. 1941;65.
192. Eder JM. *Jahrbuch für Photographie und Reproductionstechnik*. Halle a. S.: Wilhelm Knapp; 1891.
193. Reynaud E. *Théâtre optique*. Patent FR 194 482 Dez 1, 1888.
194. Tissandier G. *Le Théâtre optique de M. Reynaud*. *La Nature – Revue des sciences*. 1892;127–128.
195. Dickson WKL, Dickson A. *The life & invention of Thomas Alva Edison*. London: Chatto & Windus.
196. Lumiere A, Lumiere L. *Le Cinématographe*. Patent, FR 245 032 Feb 13, 1895.
197. Lumiere A, Lumiere L. *Kinetographic camera*. Patent, US 579,882 März 30, 1897.
198. Smith W. Effect of light on selenium during the passage of an electric current. *Nature*. 1873;7:303.
199. Adams WG, Day RE. The action of light on selenium. *Philos Trans R Soc Lond*. 1877;167:313–49.
200. Perry J, Ayrton WE. Seeing by electricity. *Nature*. 1880;21:589.
201. Nipkow P. *Elektrisches Teleskop*. Patent, DE 30105 Jan 5, 1884.
202. Baird JL. *Television and like system*. Patent, US1735946A Okt 15, 1926.
203. von Ardenne M. *Leuchtfleck-Abtaster (Flying spot scanner)*. *Tabellen zur angewandten Physik: Elektronenphysik, Übermikroskopie, Ionenphysik*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften; 1962. S. 275.
204. Braun F. Ueber ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme. *Annalen der Physik und Chemie*. 1897;296:552–9.
205. Lehmann O. *Flüssige Kristalle*. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1904.
206. Merck KGaA. *Merck Geschäftsbericht 2003: Fortschritt für Lebensqualität*. Darmstadt; 2004.
207. Voigt W. *Magneto- und Elektrooptik*. Leipzig: B. G. Teubner; 1908.
208. Voigt W. Theoretische Studien über die Elasticitätsverhältnisse der Krystalle. *Abhandlungen der Physikalischen Classe der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen*. Göttingen: Dieterichsche Buchhandlung; 1887. S. 6.
209. Voigt W. *Lehrbuch der Kristallphysik (mit Ausschluss der Kristalloptik)*. Leipzig: B. G. Teubner; 1910.
210. Hamilton WR. *Lectures on quaternions: containing a systematic statement of a new mathematical method*. Dublin: Hodges and Smith; 1853.

211. Einstein A. Hamiltonsches Prinzip und allgemeine Relativitätstheorie. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung der Physikalisch-Mathematischen Klasse. Berlin: Verlag der Königlichen Akademie der Wissenschaften; 1916. S. 1111–1116.
212. Einstein A. Näherungsweise Intergration der Feldgleichungen der Gravitation. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung der Physikalisch-Mathematischen Klasse. Berlin: Verlag der Königlichen Akademie der Wissenschaften; 1916. S. 688–696.
213. Kerr J. A new relation between electricity and light: Dielectrified media birefringent. Lond, Edinb, Dublin Philos Mag J Sci. 1875;50:337–48.
214. Born M. Über anisotrope Flüssigkeiten. Versuch einer Theorie der flüssigen Kristalle und des elektrischen KERR-Effekts in Flüssigkeiten. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung der Physikalisch-Mathematischen Klasse. Berlin: Verlag der Königlichen Akademie der Wissenschaften; 1916.
215. Born M, Stumpf F. Über anisotrope Flüssigkeiten. Zweite Mitteilung. Die Temperaturabhängigkeit der Brechungsindizes senkrecht zur optischen Achse. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung der Physikalisch-Mathematischen Klasse. Berlin: Verlag der Königlichen Akademie der Wissenschaften; 1916.
216. Oseen CW. Versuch einer kinetischen Theorie der kristallinischen Flüssigkeiten. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar. Stockholm: Almqvist & Wiksell Boktryckeri; 1921. S. 1–39.
217. Oseen CW. Versuch einer kinetischen Theorie der kristallinischen Flüssigkeiten – Zweite Abhandlung. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar. Stockholm: Almqvist & Wiksell Boktryckeri; 1922. S. 1–48.
218. Oseen CW. Versuch einer kinetischen Theorie der kristallinischen Flüssigkeiten – III. Abhandlung. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar. Stockholm: Almqvist & Wiksell Boktryckeri; 1923. S. 1–40.
219. Brown GH, Shaw WG. The mesomorphic state – liquid crystals. Chem Rev. 1957;57:1049–157.
220. Gray WG. Molecular structure and properties of liquid crystals. London: Academic Press; 1962.
221. Frank FC. I. Liquid crystals. On the theory of liquid crystals. Discuss Faraday Soc. 1958;25:19.
222. Williams R. Liquid crystals in an electric field. Nature. 1963;199:273–4.
223. Wood FW. Illuminated announcement and display signal. Patent US. 1908;974:943.
224. Heilmeier GH, Zanoni LA. Electro optical device. Patent US 3,499,112 1967.
225. Lechner B, Marlowe F, Nester E, Tults J. Liquid crystal matrix displays. 1969 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers [Internet]. Philadelphia, PA, USA: IEEE; 1969 [zitiert 12. Mai 2019]. S. 52–3. <http://ieeexplore.ieee.org/document/1154684/>.
226. Weimer P, The TFT. A new thin-film transistor. Proc IRE. 1962;50:1462–9.
227. Round HJ. A note on carborundum. In: Sze SM, Herausgeber. Semiconductor devices: pioneering papers. World Scientific; 1991. S. 879–879.
228. Lossev OV. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals. Lond, Edinb, Dublin Philos Mag J Sci. 1928;6:1024–44.
229. Destriau G. Électroluminescence -Luminiscence dans les champs électriques et phénomènes électroniques dans les semi-conducteurs. Comptes rendus Academie des sciences. Paris: Gauthier-Villars; 1939. S. 36–37.

230. Destriau G. Recherches sur les scintillations des sulfures de zinc aux rayons α . *J Chim Phys.* 1936;33:587–625.
231. Biard JR, Pittman GE. Semiconductor radiant diode. Patent US 3,293,513 1962.
232. Holonyak N, Bevacqua SF. Coherent (visible) light emission from Ga [...] junctions. *Appl Phys Lett.* 1962;1:82–3.
233. Bernanose A. Electroluminescence of organic compounds. *Br J Appl Phys.* 1955;6:S54–5.
234. Pope M, Kallmann HP, Magnante P. Electroluminescence in organic crystals. *J Chem Phys.* 1963;38:2042–3.
235. Helfrich W, Schneider WG. Recombination radiation in anthracene crystals. *Phys Rev Lett.* 1965;14:229–31.
236. Gurnee EF, Fernandez RT. Organic electroluminescent phosphors. Patent US 3,172,862 1960.
237. Tang CW, Van Slyke SA. Organic electroluminescent diodes. *Appl Phys Lett.* 1987;51:913–5.
238. Burroughes JH, Bradley DDC, Brown AR, Marks RN, Mackay K, Friend RH, u. a. Light-emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature.* 1990;347:539–541.
239. Schott. Die Zukunft liegt biegsam in Ihrer Hand. [Internet]. Geschichten über die Faszination innovativer Spezialgläser – SCHOTT Innovation. 2017 [zitiert 12. Mai 2019]. <https://www.schott.com/innovation/de/ultraduennesglas/>.
240. Langmuir I. Oscillations in ionized gases. *Proc Natl Acad Sci.* 1928;14:627–37.
241. Eddington AS. The deviation of stellar material from a perfect gas. *Mon Not R Astron Soc.* 1928;88:352–69.
242. Cap F. Lehrbuch der Plasmaphysik und Magnetohydrodynamik. Wien: Springer; 1994.
243. Bitzer DL, Johnson RL. PLATO: A computer-based system used in the engineering of education. *Proc IEEE.* 1971;59:960–8.
244. Bitzer DL, Slottow HG. The plasma display panel: a digitally addressable display with inherent memory. Proceedings of the November 7–10, 1966, fall joint computer conference on XX – AFIPS '66 (Fall). San Francisco, California: ACM Press; 1966. S. 541.
245. Bitzer DL, Slottow HG, Wilson RG. Gaseous display and memory apparatus. Patent US 3,559,190 1966.
246. Stifle J. CERL Report X-20: The PLATO IV Architecture. Mai 1972. Urbana: Computer-based Education Research Laboratory, University of Illinois; 1971.



Virtuelle Illusionen

4

Die Erzeugung von Raumbildern

Zusammenfassung

Der Mensch hat die natürliche Eignung zum Raumsehen. Der Sehapparat ist mit dem Gehirn verbunden, das in der Lage ist, Bildfehler zu korrigieren und das aufgenommene Bild zu interpretieren. Dieses grundsätzliche Verständnis des Raumes kann im Prinzip auch mit einem Auge von einer fixen Position aus erlangt werden. Durch Positionswechsel entsteht mit jeder neuen Position auch eine neue Perspektive. Kleine Positionsänderungen genügen, um einen echten Raumeindruck zu gewinnen. Das funktioniert ebenso, wenn man nicht den Kopf bewegt, sondern die reale Szene mit beiden Augen betrachtet. Das Gehirn ist ohne weiteres in der Lage, aus diesen gering unterschiedlichen Perspektiven die Wahrnehmung eines Raumes zu generieren. Im Stereoskop werden dem Auge die beiden leicht versetzten Bilder angeboten, wodurch der Eindruck einer realen Szene entsteht. Dafür muss man jedoch in einen Guckkasten zu schauen. Bequemer ist es, wenn man sich eine 3D-Brille aufsetzt und einen gleichwertigen Eindruck auf großer Leinwand genießt. Unerfreulich verbleibt dann lediglich die Brille. Aber auch hierzu gibt es Abhilfe. Seit mehr als einem Jahrhundert existieren Verfahren zur 3D-Darstellung auch ohne 3D-Brille. Was mit der Integralfotografie zu Beginn des 20. Jahrhunderts seinen Anfang nahm wurde später zur Autostereoskopie und ist heute unter dem Schlagwort Lichtfeld auf dem Weg ins 21. Jahrhundert.

4.1 Natürliche Raumsehen

Die wahre Wahrnehmung

Seit Anbeginn der Evolution sieht der Mensch mit zwei Augen und damit räumlich. Die Augen liefern beim Sehen nur den optischen Teil der Abbildung. Die endgültige Wahrnehmung des Gesehenen benötigt eine nachgeschaltete Datenverarbeitung, die aus den physikalischen Informationen einen Seheindruck erzeugt. Das visuelle System des Menschen basiert auf der Verbindung des optischen Apparates mit der Geistesleistung des Gehirns und dessen Erfahrungsspeichers. Die Abbildungsqualität der Augen ist dabei überaus begrenzt. In einem vielfach wiedergegebenen Zitat bringt es der Physiker Helmholtz auf den Punkt [1]¹. Die Qualität der reinen Abbildung durch die Augen ist schlecht. Und nicht nur das. Die Übertragung der Realität durch das Auge ist nicht nur grundsätzlich fehlerhaft, sondern auch von Mensch zu Mensch verschieden und sogar im Augenpaar einer Person unterschiedlich. Die physische Unterschiedlichkeit der Augen führt in der Regel bei den meisten Menschen zur Dominanz eines Auges (s. z. B. [2–4]). Diese Dominanz ist keineswegs fix, sondern kann in der Stärke durchaus variieren [5] und sich bei einer Person im Laufe der Zeit auch abwechseln (s. z. B. [6, 7]). Das dominante „Führungsauge“ hat einen Einfluss auf das räumliche Sehen, wie mit durch einen Valenztest mit dem augenoptischen Prüfgerät „Polatest“² nachgewiesen wurde [8]. Das Gleichgewicht des Stereosehens beeinflusst auch die Richtungswahrnehmung. Die Valenz bezeichnet die „Wertigkeit“ der Augen während des beidäugigen Sehens, wobei die Stereo-Äquivalenz die Gleichwertigkeit beider Augen meint und Stereo-Prävalenz die Häufigkeit der Präferenz eines bestimmten Auges beschreibt [9].

Das Führungsauge hat durchaus Einfluss auf das tägliche Leben, was sich besonders beim Richtungsgehen auswirkt. Auch wenn der Gehende ganz bewusst versucht, eine bestimmte Richtung einzuhalten, wird sich der Weg in Richtung des „höherwertigen“ Auges verschieben. Ein solcher Test hatte der Arzt Rosenbach 1903 durchgeführt [2]³. Ein ähnlicher Test wurde am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik mehr als 100 Jahre später noch einmal durchgeführt. Auch dabei konnte eine Tendenz zum Gehen im Kreis in unbekannten Gelände nachgewiesen werden [10], was zumindest ein Indiz

¹ „Nun ist es nicht zuviel gesagt, dass ich einem Optiker gegenüber, der mir ein Instrument verkaufen wollte, welches die letztgenannten Fehler hätte, mich vollkommen berechtigt glauben würde, die härtesten Ausdrücke über die Nachlässigkeit seiner Arbeit zu gebrauchen, und ihm sein Instrument mit Protest zurückzugeben.“ ([1], S. 21).

² Sehprüfgerät für Binokulartests (beidäugiges Sehen) der Firma Zeiss.

³ „Ferner möchte ich bemerken, dass die rechtsseitige monokulare Fixation bei binokularem Sehen vielleicht zur Erklärung des Umstandes dienen kann, dass die überwiegende Mehrzahl der Menschen beim Gehen, ... , die Neigung hat, nach rechts von der Geraden (Richtungslinie) abzuweichen.“

für den tatsächlichen Effekt ist. Man darf also annehmen, dass die Augen des Betrachters Einfluss auf die Wahrnehmung realer Umgebungen haben.

Dabei spielt nicht nur die Wertigkeit der Augen eine Rolle. Während der Fokussierung von nahen Objekten sind beim Sehen nicht nur Akkommodation und Konvergenz, sondern zudem auch der Pupillendurchmesser miteinander gekoppelt. Diesen Effekt hatte Scheiner schon vor etwa 400 Jahren bemerkt. Scheiner beobachtete die Verengung der Pupille bei der Betrachtung naher Objekte ([11], S. 31). Auch Helmholtz, der den Scheinerschen Versuch noch einmal ausführlich erläutert ([12], ab S. 95) und Bach ([13], ab S. 59) folgten dieser Annahme, wobei Bach der Konvergenz hier die initiale Funktion zuschreibt. Der Begriff „Pupillennahreflex“ (pupillary near reflex) wurde seit den 1950er Jahren von dem amerikanischen Ophthalmologen Marg verwendet [14]. Diese Bezeichnung ist noch etwas ungenauer, als die seit den 70er Jahren verwendete Bezeichnung „near triad“ [15, 16]. Dieser, in der Fachliteratur geläufige Name, wird in der deutschen Übersetzung „Naheinstellungstrias“ auch zunehmend im deutschen Sprachraum angewendet.

Wenn die Kopplung von Akkommodation, Konvergenz und Pupillendurchmesser unwillkürlich und zwingend ist, könnte man diesen Effekt nutzen, um bei Kenntnis eines Parameters auf die anderen zu schließen. Das wird aber nicht vollständig funktionieren, weil zum Beispiel die Pupillengröße auch von anderen Faktoren abhängen kann. Schon die Belastung durch die Konzentration beim Lesen verändert die Pupillengröße [17]. Bekannter ist aber die durch Emotionen hervorgerufene Verengung oder Erweiterung der Pupille [18]. Grundsätzlich kann man sagen, dass angenehme Reize oder Eindrücke die Pupille vergrößern und unangenehme Dinge die Pupille verengen. Unter Beachtung dieser Faktoren kann die Messung von Pupillengröße und Konvergenz Rückschlüsse auf die Akkommodation erlauben.

Die Wahrnehmung fußt nicht auf reiner Abbildung und deren primitiver Auswertung, sondern auf der Weiterverarbeitung der Bilddaten im Gehirn des Betrachters. Die visuelle Bildverarbeitung des Menschen ist konditioniert, Bildfehler zu korrigieren. Die retinalen Abbilder werden mit den Erfahrungswerten des Betrachters angereichert und dadurch in einen interpretationsfähigen Zustand versetzt. Die optische Auflösung des Auges ist in der Netzhautgrube (Fovea centralis) am größten und kann einen Wert von bis zu 200.000 Rezeptoren pro mm^2 erreichen. Im Bereich des peripheren Sehens kann dieser auf unter 10.000 pro mm^2 abfallen [19]. Die Auflösung des Auges ist im Vergleich zu einem Kamerasensor nicht gleichmäßig verteilt. Zusätzlich wird die Dichte von Zapfen und Stäbchen im Auge nicht nur bei verschiedenen Individuen unterschiedlich sein, sondern sogar beim gleichen Menschen zwischen den Augen variieren. Durch Einschlüsse, Narben oder Ablagerungen auf der Hornhaut, in der Linse oder im Glaskörper des Auges wird die Abbildung weiterhin verschlechtert. Die optische Abbildung mit einer primitiven, fehlerbehafteten Linse führt zudem zu Verzerrungen und Farbfehlern am Bildrand. Überraschenderweise führt das aber häufig nicht zu einer Verschlechterung der Wahrnehmung.

Abb. 4.1 La Gioconda del Prado, Werkstatt Leonardo da Vinci (zw.1503 u. 1519), Museo Nacional del Prado, Saal 56B, Madrid, Escarlati (2012), Wikimedia Commons



Die wahrgenommene Bildverbesserung ist zum Teil dadurch zu erklären, dass das Auge durch fortwährende Fixations- und Suchbewegungen immer wieder neue Bildelemente auf die Stelle des schärfsten Sehens projiziert. Dieser Effekt ist dem Konzept der „Superresolution“ im Kontext des „Computational Imaging“ nicht unähnlich. Zudem konvergieren bei der Fixation eines Objektes beide Augen des Betrachters so zueinander, dass ein Objektpunkt des fixierten Objektes auf korrespondierende Netzhautstellen vorzugsweise in (oder in der Nähe) der Fovea centralis fällt. Zusätzliche Sakkaden⁴ liefern weitere auswertbare Bildinformationen, die von der kognitiven Datenverarbeitung genutzt und in Wahrnehmung umgesetzt werden.

Zudem werden beim Sehen auch einäugig Informationen gewonnen, die eine Raumwahrnehmung befördern. Dazu gehört zuallererst die Perspektive, über die als Zentral- bzw. Farb- oder Luftperspektive („Verblauung“) und Unschärfe bei zunehmender Entfernung, schon gesprochen wurde. Dennoch sei hier noch einmal ein Beispiel gegeben, das die Kenntnis um diesen Effekt in der Renaissance belegt. An der Version der Mona Lisa aus da Vincis Werkstatt⁵, die sich heute im Prado befindet, kann der sinnvolle Einsatz der Luftperspektive gut illustriert werden (Abb. 4.1).

⁴Unwillkürliche Mikrobewegungen des Auges.

⁵Von einem seiner Schüler gemalt, vielleicht von Melzi.

Die Farbe der Objekte im Hintergrund des Bildes geht mit zunehmender (scheinbarer) vom Betrachter immer mehr ins Blaue und immer unschärfer. Das entspricht der tatsächlichen Wahrnehmung in der Realität.

Die Texturperspektive ist nichts weiter als eine Form der Zentralperspektive, bei der aus der Verkleinerung des Abstandes zwischen bekannten Strukturen auf deren Abstand zum Betrachter geschlossen werden kann. Solche in der Ferne konvergieren Texturen finden sich schon bei Alberti (s. Abb. 2.41), dessen Leistung besonders die Beschreibung der Konstruktion einer solchen Perspektive ist. Dies funktioniert nicht nur bei Texturen, sondern auch bei bekannten Objekten, bei denen durch die relative Größe, auf deren Raumanordnung geschlossen werden kann. Die relative Höhe eines Objektes beschreibt dessen Position im Bild und kann zur Schätzung einer Entfernung beitragen. Zunächst ist bei Betrachtung eines Landschaftsbildes davon auszugehen, dass Objekte, die im Bild weiter unten angeordnet sind, sich auch näher zum Betrachter befinden. Das ist in Abb. 4.2 an einem einfachen Beispiel illustriert.

Es ist einsichtig, dass bei der einigermaßen bekannten Größe eines Karnickels die Wahrnehmung eines kleineren Tieres entweder einem jüngeren Exemplar oder einer weiteren Entfernung zugeschrieben werden muss. Ein zusätzliches Indiz bietet neben der scheinbaren Größe auch die Relativposition des Bunnys im Bild. Es ist entscheidend, in welcher relativen Höhe sich Objekt zur Horizontlinie befindet. Bei gleicher absoluter Objekthöhe müsste sich ein Objekt relativ dichter am Horizont befinden, wenn es weiter entfernt ist. Ein höhersitzender Hase ist demnach vermutlich weiter entfernt, als einer, der am unteren Bildrand hockt. Einleuchtend ist auch die Funktionsweise der Verdeckung. Ein Objekt, das ein anderes verdeckt, muss sich zwangsläufig vor diesem befinden.

Abb. 4.2 scheinbare
Größe, Relativposition und
Verdeckung am Beispiel des
Stanford Bunny, Grasnick
(2019)



Verdeckungen können bei nahestehenden Objekten, die im wahrgenommenen Bild eng nebeneinander erscheinen, aber tatsächlich in der Raumtiefe versetzt sind, zuweilen auch durch Bewegung des Kopfes oder durch Einnahme einer günstigeren Position zum Beobachtungsobjekt aufgedeckt werden. Dadurch entsteht der Effekt einer scheinbaren Bewegung der eigentlich stillstehenden Objekte. Diese scheinbare Änderung ist die Parallaxe oder auch, wenn sie durch Bewegung erzeugt wird, Bewegungsparallaxe. Der Wert der Scheinbewegung eines Objektes ist ein Indiz für dessen Entfernung zum Betrachter. Ein entferntes Objekt wird sich nicht in der Position kaum bewegen, während ein nahes Objekt scheinbar deutliche Bewegungen ausführen wird.

Ein weiteres Indiz zum Verständnis des Raumes sind die Schatten, die Objekte werfen. Die Lage und Länge der Schatten erlauben Rückschlüsse auf Form und Größe der Objekte.

Das soll an einer kleinen Skizze verdeutlicht werden. In Abb. 4.3 auf der linken Seite befindet sich ein grauer Ring. Sollte man allein aus diesem Bild auf die 3D-Form des gezeichneten Objektes schließen, so läge die Vermutung nahe, es handelte sich um eine flache Scheibe. Die gleiche Form erlaubt aber je nach Schatten aber auch andere Interpretationen. So könnte es sich beim mittleren Objekt um ein schalenähnliches Gebilde handeln beim rechten eher um einen Kegelstumpf.

Das setzt aber die gedankliche Positionierung einer Lichtquelle oben links voraus. Verschiebt man diese im Geiste nach unten rechts, kehrt sich auch die wahrgenommene Tiefe um.

Im realen Leben braucht man dabei nicht lange zu überlegen. Der Wurf des Schattens ist zur Genüge aus der Erfahrung bekannt. Die Erfahrung ist ohnehin ein wichtiges Werkzeug zur Erkenntnis. Ein Objekt, dessen Größe bekannt ist, kann in der Entfernung leicht geschätzt werden. Von einem Schattenwurf kann auf die räumliche Form des beleuchteten Gegenstands geschlossen werden.

Die Wichtigkeit der monokularen Tiefenkriterien für die räumliche Wahrnehmung ist kaum zu überschätzen. Insbesondere bei großen Entfernungen ist die Unterschiedlichkeit der Netzhautbilder beider Augen zu gering, um noch auswertbar zu sein. Daher müssen die einäugig gewonnenen (oder eben beidäugig identischen) Informationen ausreichend sein, um die für die jeweilige Situation notwendigen Erkenntnisse zu erhalten. Das visuelle System ist auf diese Wahrnehmung so trainiert, dass auch in einem

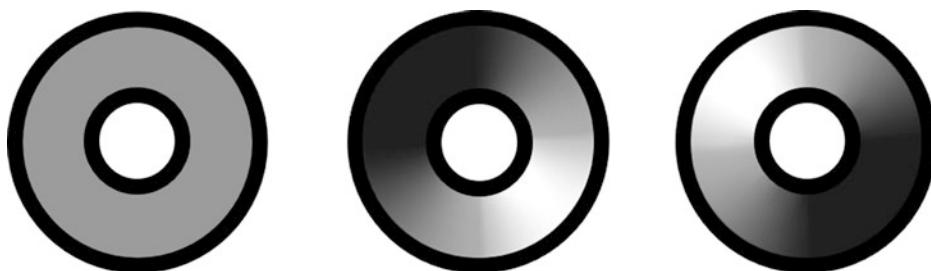


Abb. 4.3 Kreisringe mit Schattenwurf, Grasnick (2019)

zweidimensionalen auf die räumliche Anordnung geschlossen werden kann, ja diese sogar unbewusst erkannt wird.

Beim natürlichen Raumsehen wird automatisch unterstellt, dass eine 3D-Wahrnehmung nur dann erfolgen kann, wenn das Objekt mit beiden Augen gleichzeitig betrachtet wird. Es wurde erläutert, dass auch weitere Effekte wie Perspektive, Bewegungsparallaxe oder Verdeckungen zum Raumverständnis betragen, wodurch einäugig ebenfalls Erkenntnisse zur Struktur des 3D-Raumes gewonnen werden können. Der entstehende Eindruck ist seinem Wesen nach zweidimensional, es werden lediglich Rückschlüsse auf die Raumanordnung gewonnen, mit früheren Erfahrungen verglichen und schließlich mit dem 2D-Eindruck vermengt. Bei diesem Prozess übernimmt das Gehirn die nachgeordnete Bildverarbeitung und versucht, die Szene zu verstehen. Erst der Vergleich der Auswertung mit den Erfahrungswerten des Sehenden ermöglicht eine Einordnung in die bekannte Erkenntniswelt und somit die Interpretation des Raumes. Dies alles geschieht vollkommen unbewusst und unwillkürlich. Dieser kognitiv angereicherte Eindruck kann auf den Betrachter durchaus räumlich wirken. Es zeigt sich jedoch bei näherer Betrachtung, dass die Tiefenstaffelung von Objekten im Raum auch einäugig korrekt interpretiert werden kann, die Wahrnehmung dagegen nur scheinbar eine räumliche ist. Obwohl die Szene in den Raumkoordinaten interpretiert werden kann, bleibt ein echter, räumlicher Effekt aus. Hat man einen direkten Vergleich (indem man z. B. eine Szene abwechselnd mit einem und beiden Augen betrachtet), bemerkt man den fehlenden Raumeindruck bei monokularer Betrachtung sofort.

Missing-the-Bottle-Test

Setzen Sie sich auf einen Stuhl vor einen Tisch und schließen Sie beide Augen. Währenddessen stellt Ihr Assistent (wahlweise auch Ihre Assistentin) eine Flasche vor Ihnen auf den Tisch. Es spielt dabei keine Rolle, ob oder womit die Flasche gefüllt ist, wichtig ist lediglich, den Standort der Flasche nicht zu kennen. Nachdem Sie aufgefordert werden, ein Auge zu öffnen (und nur eins!), versuchen Sie, die Flasche von der Seite zu packen. Es wird Ihnen wahrscheinlich schwerfallen oder sogar misslingen.

Wenn Sie den Versuch wiederholen und dabei beide Augen öffnen, sollten Sie die Flasche leicht greifen können.

Missing-the-Bottle-Test – erhöhte Schwierigkeit

Ein ganz ähnlicher Effekt stellt sich bei einer Vergiftung einstellen. Um eine solche Situation herbeizuführen, kann mit den Test 1 ein wenig abändern. Dabei ist es wichtig, dass eine Flasche mit einem hochprozentigen, alkoholischen Inhalt zur Verfügung steht. Man muss nun den Inhalt der Flasche nach und nach solange zu sich nehmen, bis man derart betrunken ist, dass die Kontrolle über die eigenen Augenbewegungen deutlich verringert wird und Doppelsehen eintritt. Bei der nachfolgenden Testdurchführung ist es dann egal, ob dieser ein- oder beidäugig durchgeführt wird – mit großer Wahrscheinlichkeit wird der Test misslingen, da man so oder so infolge der Trunkenheit funktional einäugig ist.

4.2 Binokulare Raumwahrnehmung

Vom Sehen mit zwei Augen

Die binokulare Raumwahrnehmung oder ganz einfach das Sehen mit zwei Augen ist keine neuzeitliche Entdeckung. Bereits in der Antike wird das beidäugige Sehen thematisiert.

Dabei stellt sich die Frage, wie es gelingt, dass trotz unterschiedlicher Bilder immer nur ein Gegenstand gesehen wird. Empedokles hat dafür eine recht sympathische Erläuterung. Er sah in der Liebesgöttin Aphrodite die Erschafferin der Augen, die sie im Wesentlichen aus Flammen und mit einer geringfügigen Beimischung von Erde zusammengefügt und mit einer Art von „Liebesnägeln“ die Augen montiert und vereint hatte. Und so kommt es zu dem uns allbekannten Resultat (aus [20], S. 254):

„Eins wird beider Augen Blick.“

Damit geben sich die Schüler des Aristoteles nicht zufrieden. In den nach aristotelischen Schriften „Problemata physica“, die als Lehrbücher von Angehörigen des Peripatos, der philosophischen Schule des Aristoteles, herausgegeben wurden, findet sich im Buch XXXI „Was die Augen betrifft“ auch eine Erklärung zum Doppelzehen (aus [21], S. 265).

„Warum erscheinen bei denen, die die Augen verdrehen, die Dinge doppelt? Doch wohl, weil die Bewegung von jedem der beiden Augen nicht zu dem gleichen Punkte gelangt. Daher legt unsere Seele das doppelte Sehen wie das Sehen von zwei aus.“

Das ist gut beobachtet. Der Schielende sieht doppelt, weil die Sehachsen sich nicht in einem Punkt schneiden und sieht dadurch zwei Gegenstände anstelle von einem.

Sicherlich ist das nicht die ganze Wahrheit. Auch beim Einfachsehen mit zwei Augen sieht man unterschiedliche Bilder. So beschreibt Euklid das größere Gesichtsfeld beim Sehen mit zwei Augen (aus [22], S. 18).

Theor. 26. Wenn eine Kugel mit beiden Augen gesehen wird, und ihr Durchmesser der geraden Linie zwischen den beiden Augen gleich ist, so sieht man die Hälfte derselben.

Darin sind zwei wichtige Beobachtungen enthalten. Zum einen die, dass das Gesehene eines jeden Auges unterschiedlich ist, da man ja nur jeweils die Hälfte sieht. Des Weiteren ist die Konsequenz des Gesagten, dass man mit beiden Augen beide Hälften, also wieder das Ganze, erblickt.

Eine grundsätzlich geometrische Analyse des Sehens mit zwei Augen wird auch von Ptolemäus verfolgt und mit verschiedenen Experimenten nachgeprüft. Nach Ptolemäus fusionieren die Sehkegel der beiden Augen zu einem gemeinsamen Sehkegel, wenn beide Augen sich auf das gleiche Objekt ausrichten. Die Sehachsen, die von jedem Auge zum Objekt, dem gemeinsamen Betrachtungspunkt, führen, werden um eine virtuelle

Achse angereichert. Diese Achse beschreibt faktisch den zyklopischen Betrachtungspunkt zwischen beiden Augen. Auf dieser fiktiven Achse erscheinen die Dinge, die fixiert werden (s. [23], S. 286).

„Jene [Dinge] nämlich, die auf den Achsen selbst liegen scheinen deutlich einen einzigen Ort anzunehmen, der die gemeinsame Achse ist.“

Es ist sicher nicht verkehrt, hierzu eine kleine Skizze einzufügen, um die gemeinsame Seh-Achse des Ptolemäus zu beschreiben. In der Abb. 4.4 sieht der Betrachter mit beiden Augen auf das Objekt (blaue Achsen). Die gemeinsame Achse wird durch die rote Linie gebildet.

Die Erkenntnis, dass beim beidäugigen Sehen unterschiedliche Bilder für jedes Auge erzeugt werden und dennoch ein gemeinsames, einzelnes Objekt gesehen wird, hat regelmäßig diejenigen beschäftigt, die sich ohnehin der Optik zugewandt hatten. Man kommt schlüssig und einfach nicht umhin, dieses Mysterium auch im täglichen Leben zu bemerken. Natürlich hatte sich auch Alhazen mit dem beidäugigen Sehen beschäftigt und genau wie Ptolemäus eine gemeinsame Achse der Augen beim Sehen etabliert. Diese mittlere Achse ist auch bei Alhazen entscheidend für die Vermeidung des Doppelzusehens. In Risners Zeichnung zu Alhazens Ausführungen (Abb. 4.5) sind einige Linien eingezeichnet, die Sehkegel der Augen, die Achsen zu den betrachteten Punkten und die jeweilige gemeinsame Achse zeigen.

Der beigelegte Text erhellt die Zeichnung und lässt erkennen, dass auch Alhazen die Sehkegel von den Augen abgehen lässt. In der Entfernung, an der sich die Sehachsen beider Augen treffen (also im Fixationspunkt) kann man eine Fläche aufspannen, die den Augen parallel gegenüber liegt. In diesem Bereich wäre Einfachsehen möglich.

Abb. 4.4 gemeinsame Sehachse des Ptolemäus,
Grasnick (2019)

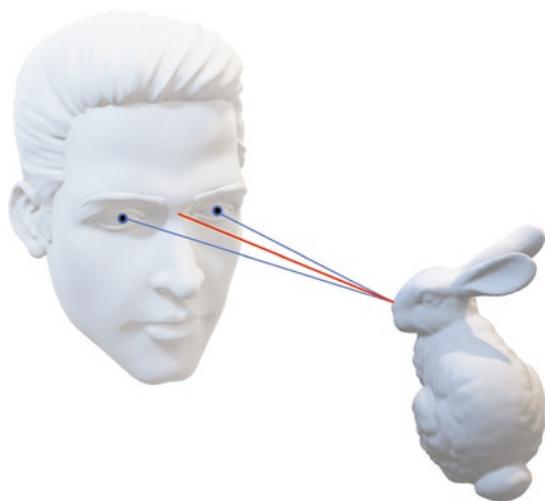
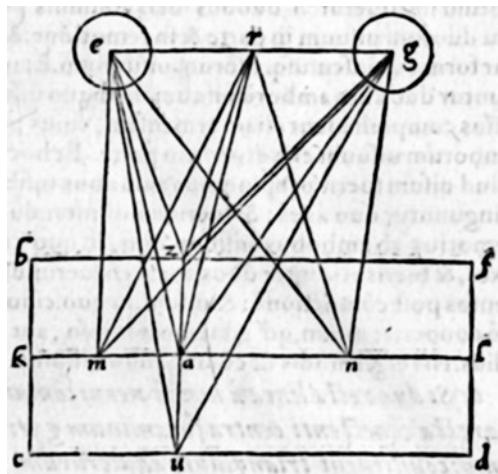


Abb. 4.5 Binokularsehen.

(Nach Alhazen, Friedrich Risner (1572), aus [24], S. 77)



Die Einführung des Bildbegriffes beim Sehen gebührt sicherlich Kepler, der tatsächlich die Punkte eines Objektes als Bild auf der Netzhaut des Betrachters beschrieb.

Kepler kreierte einen Lehrsatz zum beidäugigen Sehen (aus [25], S. 30),

„Werden beide Netzhäute in gleicher Weise gereizt, so glauben wir ein einziges Bild zu sehen; werden aber die beiden Netzhäute in ungleicher Weise gereizt oder bemalt, so erscheinen uns die Gegenstände doppelt statt einfach.“

Mit dieser Definition und den ausführlichen optischen Theorien Keplers konnte man sich dem binokularen Sehprozess auch als optische Abbildung nähern. Descartes ist dies in seiner „Dioptrique“ [26] vorzüglich gelungen. Sein Verständnis des binokularen Sehens ist in Abb. 4.6 dargestellt. Dabei sieht man gut die Abbildung der Objektpunkte an unterschiedlichen Netzhautpositionen der Augen. Zudem ist die Anbindung der Augen über Nervenbahnen an das Gehirn des Sehenden dargestellt.

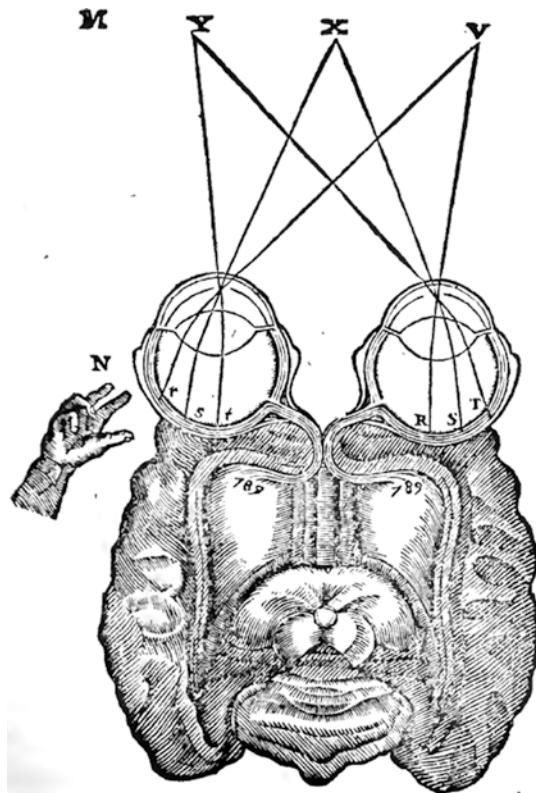
Die optische Strahlkraft eines Kepler oder Descartes waren in dieser Zeit immens. Es dauerte nicht lange, bis auf deren Vorarbeiten basierende optische Geräte hergestellt wurden.

Das im Jahre von Smith 1738 vorgelegte „komplette System der Optik“ [27] enthält einige Gedanken zum binokularen Sehen. In der deutschen Übersetzung von 1755 findet sich im Kapitel „Vom doppelten Fernrohre“ eine tatsächliche räumliche Wirkung (aus [28], S. 344):

„Auch zeiget sich außer der lebhaften Erscheinung einerley Sache, durch beyde Fernröhre noch etwas anderes merkwürdiges. In jedes Fernrohres Brennpunkte ist gewöhnlichermaßen ein Ring in einem so groß, als in dem andern, die Bilder, die daselbst entstehen, zu begränzen; Wenn man jeden dieser Ringe allein mit Verschließung des andern Auges betrachtet, so erscheinen sie gleich, und vom Auge gleich entfernt, aber wenn man sie mit beiden Augen zugleich betrachtet, sehen sie viel größer und entfernter aus, und die Sachen, die man durch sie siehet, sehen auch größer aus, ob sie wohl durch die vereinigten Ringe in eben den Stellen, wie vorhin, begränzt werden.“

Abb. 4.6 Binokularsehen.

(Nach Descartes, René
Descartes (1657) aus [26],
S. 49)



Smith beschreibt hier einen Effekt, der durch horizontale Verschiebung zweier gleichartiger Objekte und deren Beobachtung mit Parallelblick auftritt. Das doppelte Fernrohr wirkt in diesem Fall wie ein Stereoskop. Er macht eine weitere Beobachtung mit zwei Zirkelspitzen, die er vor sein Auge hält (aus [28], S. 345):

„Wenn man aber die Schenkel [des Zirkels, Anm. d. Verf.] mit der Hand zusammendrücket, ... werden auch die beyden innern Schenkel gänzlich zusammen fallen, ..., und lebhafter, dicker und länger, als ordentlich erscheinen, so daß sie sich von der Hand, an die entfernteste Sache, die man im Gesichte hat, strecken, wenn es auch im Horizonte selbst wäre....“

Smith experimentiert mit anderen gleichartigen Gegenständen (z. B. Tabakspfeifen und Strohhalmen) und kommt auf folgende Erklärung:

„Meines Erachtens ist folgendes die Ursache: Wenn man eines von den Augen um das andere verschließt, so wird man sehen, daß allemal das offene Auge, die vor ihm befindliche Spitze des Zirkels, und der Gegenstand, in einer geraden Linie sind. Die Ursache also von der scheinbaren Vereinigung der Zirkelspitzen ist, weil jede ihr Bild in dem ihr zugehörigen Auge da hat, wo das Bild der Sache in demselben Auge hinfällt, deswegen sie beyde an der Stelle der Sache befindlich zu seyn scheinen.“

Diese Erläuterung beinhaltet einen Aspekt, der für das räumliche Sehen notwendig ist. Die Bildpunkte eines Objektpunktes fallen auf unterschiedliche Stellen der Netzhaut des jeweiligen Auges. Diese Punkte sind zwar unterschiedlich, stammen aber vom selben Objektpunkt und stehen daher unwillkürlich in Verbindung. Man spricht deshalb auch von korrespondierenden Bildpunkten. Die Distanz zweier korrespondierender Bildpunkte als Abweichung von der Fixationsachse⁶ wird wiederum als Disparation⁷ bezeichnet. Der Begriff Disparation wird speziell für die Beschreibung dieses Sachverhaltes bei der räumlichen Wahrnehmung verwendet. Neben den eingangs erwähnten monokularen Tiefenkriterien ist die Disparation die zentrale Ursache des räumlichen Sehens.

Risner hatte in seiner Zeichnung (Abb. 4.5) den von Alhazen erläuterten Sachverhalt schon ganz richtig dargestellt. Zugegebenermaßen ist die Skizze nicht selbsterklärend. Da ist Descartes Zeichnung schon deutlicher. Hier liegen aber die Objektpunkte alle in einer Ebene. Disparation tritt auf, wenn die Objektpunkte sich in unterschiedlichen Entfernungen befinden.

Dabei stellt sich wieder die seit der Antike aktuelle Frage, wann man ein Objekt einfach und wann man es doppelt sieht. Der Objektraum, in dem sich die Objekte befinden müssen, um auch mit beiden Augen noch als ein einzelnes Objekt wahrgenommen zu werden, wird als „Horopter“⁸ bezeichnet. Der Name ist nicht neu, sondern wurde schon Anfang des 17. Jahrhunderts in den Büchern des Aguilonius gebraucht [30]. Damit hatte Aguilonius eine gedankliche Fläche beschrieben, auf der Objekte beidäugig wahrgenommen werden können.

In den Jahrhunderten seit Aguilonius' Vorschlag des Horopters hat man die Idee beständig weiterentwickelt. Zunächst wurde schnell klar, dass eine Linie oder Planfläche nicht der tatsächlichen Erfahrung entspricht. Der Mediziner Baer erklärte den Horopter beim Blick auf einen Gegenstand C auf seine eigene Weise (aus [31], S. 223).

„Wenn der Horopter die Fläche ist, in der wir die Gegenstände einfach sehen, so ist er, genau genommen, nicht eine Ebene, sondern eine Kugelfläche, die durch beide Pupillen und den Punkt C geht“.

Die Fläche des Horopters ist also nicht plan, sondern hat eine Kugelgestalt. Das spricht in etwa der Beobachtung, die der Dessauer Lehrer Vieth⁹ 1817 mit Bleistift und Zirkelspitze praktisch nachprüfte [33]. Der Physiologe Müller machte sich ähnliche Gedanken,

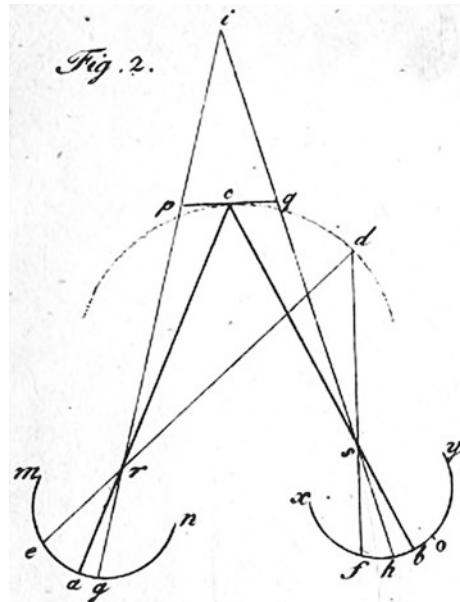
⁶Die Distanz jedes Punktes wird von der Position des abgebildeten Fixationspunktes (der Achse eines Auges) aus gemessen.

⁷Auch „Querdisparation“ bei rein seitlicher Verschiebung.

⁸Horopter: aus griech. gr. horos = Grenze + opter = Späher, Sehgrenze, Projektionsebene, der Inbegriff der Punkte des äußeren Raumes, die sich auf korrespondierenden Stellen beider Netzhäute abbilden und deshalb einfach gesehen werden [29].

⁹Vieth ist sicherlich bekannter als Turnvater und als Verfasser einer Enzyklopädie der Leibesübungen [32].

Abb. 4.7 Theoretischer Horopter. (Johannes Müller (1826) aus [34], Tafel IV, Fig. 2)



die er wissenschaftlich untersuchte. Vermutlich in Unkenntnis von Vieths Beobachtung, den er zumindest namentlich nicht erwähnte, bestimmte Müller den Horopter „nach dem Beispiele des Aguilonius“ ([34], S. 178) nun als Kreis. Diesen Kreis, der heute als „Vieth-Müller-Kreis“ bekannt ist, beschrieb Müller so (aus [34], S. 240):

„Alle Gegenstände also, welche in der kreisförmigen Ebene des Horopters liegen, werden einfach und deutlich, alle Gegenstände außerhalb derselben werden doppelt und undeutlich gesehen.“

Damit ist der theoretische Horopter definiert und in Abb. 4.7 dargestellt. Auch hier richten sich die Augen auf einen gemeinsamen Punkt (c), auf den beide Sehachsen gerichtet sind (dargestellt durch die Strecken ac und bc). Die Punkte, die auf dem Kreissegment des Horopters liegen, werden einfach gesehen – der Rest nicht.

Der tatsächliche Horopter richtet sich natürlich nicht nach Müllers theoretischen Vorgaben. Der Physiologe Hering kritisierte die Abhandlungen von Helmholtz über den Horopter¹⁰, da er dessen Berechnungen schon bei seinem eigenen Sehen nicht nachvollziehen konnte [35]. Bei Hering zerfällt nun der Horopter in einen mathematischen empirischen Anteil, der den wahren Horopter auch durch das Experiment beweist [36]. Das

¹⁰In Kritik stehen hier aus Helmholtz' Abhandlung besonders „Die Vertheilung der correspondirenden Punkte in beiden Sehfeldern“, die „Form des Horopters“ und die „Bedeutung des Horopters beim Sehen“.

Konzept eines empirischen Horopters mit der Heringschen Unterteilung zwischen „wirklichem Ding“ und „Sehding“ übernimmt auch Hillebrand, ein ehemaliger Mitarbeiter Herings, einige Jahre später [37]. Der Philosoph Hillebrand beschreibt den Sehvorgang recht anschaulich und findet unterschiedliche Horopterformen als Resultat des Sehens in unterschiedliche Entfernen. Insgesamt erlaubten die Erkenntnisse von Hering und Hillebrand die Anerkenntnis der Abweichung des theoretischen vom praktischen Horopter und fanden als „Hering-Hillebrandsche Horopterabweichung“ Eingang in die Fachliteratur.

Der dänische Physiologe Panum hatte sich intensiv mit dem „Sehen mit zwei Augen“ beschäftigt. Er erkannte, dass auch bei der Betrachtung von Dingen, die nicht auf dem Horopter liegen, nicht immer zwingend Doppelbilder auftreten [38]. Wenn man also den Horopter konsequent als den Bereich bezeichnet, in dem die sich darin befindlichen Objekte immer einfach gesehen werden, so vergrößert sich die ursprüngliche einfache Form zu einem Raum, dem Panum-Areal. In diesem Bereich können die Bilder des linken und rechten Auges zu einem gemeinsamen dreidimensionalem Seheindruck verschmelzen. Als Wert der Qualität der Fusion und damit des Stereosehens, der Stereopsis, kann die maximale Disparität der Einzelbilder gelten, die bei einem Test durch im Raum gestaffelte Objekte erzeugt wird. Heute kann dies sehr einfach mit einem 3D-Monitor oder einer VR-Brille geprüft werden, indem dem Probanden Testbilder mit definierter Disparität angeboten werden und die Disparität bestimmt wird, bei der die Testperson beginnt, Doppelbilder zu sehen.

Aber selbst außerhalb des Panum-Raums könnte Tiefensehen stattfinden, wenn durch gezielte Unschärfen bei der Abbildung von Objekten außerhalb des Fixationspunktes die Wahrnehmung von Doppelbildern vermieden werden kann.

4.3 Raumstörung

Wahrnehmungsprobleme mit 3D-Brille

Die Raumwahrnehmung erfolgt also primär durch die Netzhautbilder und deren Auswertung. Diese unterschiedlichen Bilder auf der Netzhaut können nicht nur durch reale Umgebungen, sondern auch ganz gezielt durch die Präsentation eines Stereobildpaars erzeugt werden.

In der Realität kann die Raumwahrnehmung aber auch gestört sein. Die binokulare Raumwirkung einer stereoskopischen 3D-Präsentation kann nicht von allen Menschen wahrgenommen werden. Sehstörungen (z. B. Schielen oder Augenzittern) erschweren die binokulare Wahrnehmung oder liefern Doppelbilder. Die funktionale¹¹ oder praktische¹² Einäugigkeit kann sogar zu „Stereoblindheit“ [39] und damit zum vollständigen

¹¹Unvermögen zu binokularem räumlichem Sehen.

¹²Fehlende Sehleistung eines Auges.

Verlust des binokularen Raumsehens führen. Die Betonung liegt hier bewusst auf dem Zusatz „binokular“. Durch monokulare Tiefenwahrnehmung und besonders durch die Bewegungsparallaxe können sich auch Stereoblinde ohne Probleme im realen Raum zurechtfinden. Eine binokulare Illusion kann diesen Personen aber zu keinem Raumlebnis verhelfen.

Unabhängig von verschiedenen Erkrankungen des Auges, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll, hängt die Wahrnehmung auch von anderen Faktoren ab. Zu allererst muss hier der Augenabstand genannt werden. Zwar liegt der Abstand der Augen bei den meisten Menschen in einem gewissen Rahmen¹³, hat aber durchaus Einfluss auf das Tiefensehen. Ein Kind mit kleinem Augenabstand wird eine geringere Disparität der Netzhautbilder erfahren als ein Erwachsener mit riesigem Kopf und erheblichem Augenabstand. Das bedeutet natürlich nicht zwangsläufig, dass auch die Tiefe anders wahrgenommen wird. Bekanntlich überlagert ja das visuelle System die Abbildungen mit den Erfahrungen und erzeugt so durchaus eine „korrekte“ Wahrnehmung. Der Augenabstand hat aber einen erheblichen Einfluss auf das künstliche Stereosehen mit 3D- oder VR-Brillen. Wenn die Darstellung nicht auf den Augenabstand des Betrachters angepasst ist, sieht der Betrachter ein Bild, dass nicht zu seiner üblichen Wahrnehmung passt. Im 3D-Kino ist die Disparität der Bilder des Bildpaars bereits während der Aufnahme durch den Basisabstand der Stereokamera (der Abstand beider Objektive voneinander) festgelegt. Während der Projektion lässt sich daran nichts verändern, alle Besucher sehen also das gleiche. Der Film ist für einen durchschnittlichen Besucher mit „normalen“ Augenabstand gemacht. Die Konsequenz daraus ist, dass der große Kerl mit beachtlichem Augenabstand nun ein Bildpaar angeboten bekommt, dass nicht seinem Augenabstand (seiner Stereobasis), sondern dem der Stereokamera entspricht. Da dieser Basisabstand deutlich kleiner sein wird, nimmt der Betrachter ein Bild wahr, das deutlich in der Tiefe reduziert ist. Der umgekehrte Fall tritt bei dem Kind ein. Das Kind sieht nun eine deutlich in der Tiefe vergrößerte Darstellung und fürchtet sich. Es wurde schon gesagt, dass die Wahrnehmung zu einem guten Teil auch antrainiert ist und über eine gewisse Zeit auch automatisch konditioniert wird.

Vom Einfluss der Bildgröße auf das 3D-Sehen

Zudem ist natürlich die Disparität der beiden Einzelbilder des 3D-Films abhängig von der Größe der Projektion auf der Leinwand. Je größer die Kinoleinwand ist, desto größer ist damit auch die Disparität. Nehmen wir nun an, das vorhin erwähnte Kind hätte eine Belobigung verdient und dürfte mit seinen Eltern in das Kino mit der größten Leinwand in Deutschland, in den Leonberger „Traumpalast“ mit einer Leinwand

¹³Üblicherweise beträgt Augenabstand seit Wheatstone 63,5 mm [40] bei einer Streuung zwischen 47–78 mm [41].

von 38×22 m. Wollte der Betreiber dort einen üblichen 3D-Film abspielen, würde die Belohnung schnell zur Strafe. Die Disparität der 3D-Bilder wäre so stark, dass das Kind nicht die geringste Chance hätte, die Bilder zu fusionieren. Nach einigen Ermahnungen durch die großkopfigen Eltern, sich doch bitte nicht so anzustellen, würde das Kind schließlich an den ständigen Doppelbildern verzweifeln und sich vielleicht sogar übergeben.

Der Bursche mit dem großen Augenabstand würde sich vielleicht den gleichen Film auf seinem neusten 3D-Fernseher anschauen wollen. Selbst bei einem sehr großen Fernseher (z. B. 65") wäre die horizontale Ausdehnung des Fernsehers nur noch etwa 1,4 m, also 1/25 des Riesentheaters. Der 3D-Eindruck unseres Betrachters wäre enttäuschend. Die Bilder wären flach, die Tiefe kaum wahrnehmbar. Er würde also lamentieren und vielleicht eine Rückabwicklung seines Kaufes in Erwägung ziehen.

Es zeigt sich schon an in diesem Beispiel, dass es wichtig ist, das Ausgabemedium für einen 3D-Inhaltes zu kennen.

Der Abstand der Objekte in den Einzelbildern eines Stereopaars darf immer nur den Wert des Augenabstandes einnehmen. Das entspricht der Parallelstellung der Augen beim Blick in weite Entfernung. Eine Auswärtsdrehung der Augen, der „binokulare Exzess“, ist zwar in gewissem Maß für kurze Zeit möglich, aber unnatürlich, anstrengend und unangenehm.

Hinzu kommt, dass beim Sehen mit einer 3D-Brille die Bewegungsparallaxe fehlt. Im realen Sehen erzeugen geringste Bewegungen des Kopfes oder der Augen immer wieder neue Perspektiven. Die Anzahl dieser Perspektivansichten ist in der Natur nicht begrenzt, sondern nur durch die Szene vorgegeben oder limitiert. Diese Bewegungsparallaxe liefert starke Reize, die eine Raumwahrnehmung begünstigen. Die Nutzung von 3D-Brillen verhindert die Bewegungsparallaxe. Das stereoskopische Bildpaar enthält nur noch die beiden Perspektiven für das linke und rechte Auge. Bei Bewegung des Kopfes erwartet ein Betrachter unwissentlich die zugehörige Änderung des Seheindruckes. Das ist bei der Betrachtung weniger 3D-Bilder oder eines stereoskopischen Kurzfilms zumeist kaum hinderlich. Ein abendfüllender 3D-Film kann diesen Fehler nach längerer Betrachtung offenbaren. Die wahrgenommenen Bilder und der resultierende Raumeindruck müssten sich erwartungsgemäß bei Eigenbewegung verändern. Entgegen der alltäglichen Erfahrung verändert sich die Perspektive jedoch nicht, was unvereinbar mit dem realen Erleben ist. Der Konflikt aus erwartetem und geliefertem Ergebnis kann mit zunehmender Beobachtungszeit zu Unwohlsein oder Übelkeit führen. Je deutlicher der Unterschied zwischen Erwartungshaltung und Ergebnis wahrzunehmen ist und je länger die Abweichung anhält, umso wahrscheinlicher ist eine körperliche Reaktion auf das Gesehene.

Eine VR-Brille, die am Kopf getragen wird, bietet hier Vorteile. Zu jeder neuen Position oder Sehrichtung wird das entsprechende Bildpaar errechnet. Daraus kann sich aber wieder ein neues Problem ergeben. Die Berechnung der Bilder aus dem 3D-Modell und deren Darstellung auf den Displays der VR-Brille benötigt Zeit. Das bedeutet, dass die Darstellung erst eine gewisse Zeit nach Ausführung der Bewegung erfolgt. Auch eine

Shutterbrille benötigt zur Ausführung eines Durchlaufs (also zur Darstellung eines Stereobildpaars) etwas Zeit. Die Shutterbrille verbirgt oder erlaubt die Sicht auf den Bildschirm. Dabei werden die Bilder und der Shutter so synchronisiert, dass der Bildinhalt zum offenen Shutter passt (linkes Bild für linkes Auge). Die Abfolge der Bilder muss schnell genug sein, um nicht als Flimmern wahrgenommen zu werden. Eine Bildsequenz aus Einzelbildern, die in schneller Folge nacheinander abgespielt werden, kann ab einer bestimmten Bildwiederholfrequenz nicht mehr in ihre Einzelbilder aufgelöst werden. In der Folge verschmelzen die Bilder miteinander und eine kontinuierliche Positionsänderung von Bild zu Bild kann als Bewegung wahrgenommen werden. Mach hatte in einer Analyse über den Zeitsinn des Ohres versucht, die Zeitspanne zu messen, bei der zwei Signale noch unterscheidbar sind [42]. Er misst die „kleinste wahrnehmbare Zeit“ mit exakt 47 ms und beschreibt diese als „für das Auge verschwindend“. Zwei Bilder müssten nach Mach mit einer Bildwiederholfrequenz von 21 Bildern pro Sekunde¹⁴ abgespielt werden, um als ein einziges Bild wahrgenommen zu werden. Bei der Entwicklung des Filmbetrachters „Kinetoskop“ erwähnt Edison in einer Notiz mit der Festlegung auf 25 Bilder pro Sekunde einen überaus aktuellen Wert (aus [43], S. 2):

„It is probable that 25 per second will be sufficient to give the illusion“

Der Wert 25 Bilder pro Sekunde (40 ms Bildabstand) ist die übliche Bildrate für ein Vollbild im Fernsehsignal. Die Psychologen Wittmann und Pöppel wollten es genauer wissen. Sie erklärten, der kleinste zeitliche Abstand zwischen zwei Wahrnehmungen hätte eine Länge von nur 30 ms [44]. Pöppel gibt auch eine mögliche Erklärung für das Verschmelzen der Signale ab. Der Transport optischer Signale im visuellen System benötigt schon mehr als 20 ms vom Reiz bis zu dessen Wahrnehmung [45]. Dadurch ist ein Beobachter innerhalb dieser Zeitspanne nicht in der Lage, auf einen Reiz zu reagieren. Alles, was also innerhalb eines Zeitfensters kleiner als 20 ms an optischen Reizen auf den Betrachter einwirkt, wird als gleichzeitig wahrgenommen.

In der alltäglichen Wahrnehmung ist der Betrachter selten nur einem einzelnen Reiz ausgesetzt. Besonders realer Bewegung wirken unterschiedliche Reize gleichzeitig auf den Körper. Der Wahrnehmende verändert ständig seine Lage oder bewegt zumindest den Kopf. Diese Veränderungen werden durch den Gleichgewichtssinn und die Eigenwahrnehmung bemerkt und gehen mit einer zeitgleichen, unwillkürlichen Änderung der Perspektive einher.

Das ändert sich beim interaktiven Spielen mit VR-Brille¹⁵. Zwar werden auch dort die Bewegungseffekte gemeinsam mit den Bildern auf den Displays wahrgenommen. Aber, wie schon gesagt wurde, benötigt die Berechnung der Bilder und deren Darstellung

¹⁴Entspricht 1/0,047 Sekunde pro Bild.

¹⁵Die Problematik der „Simulator Sickness“ ist auch den Herstellern solcher Brillen bekannt. So empfiehlt Oculus in einem Blog eine Strategie zur „Milderung“ der Latzen [46], in dem sich unter anderem auch die 20 ms wiederfinden.

auf dem Display der Brille Zeit. Dadurch entsteht ein zeitlicher Versatz. Die neue Perspektive wird später wahrgenommen, als die Bewegung, die zu dieser neuen Perspektive geführt hat. Wenn dieser Zeitversatz (delay) länger als die besagten 20 ms dauert, kann er vom Spieler (bewusst oder unbewusst) wahrgenommen werden. Es macht Sinn, das mit dem natürlichen Erleben zu vergleichen. Eine derartige zeitliche Verzögerung zwischen actio (der Bewegung) und reactio (der Wahrnehmung) ist eigentlich immer nur dann zu beobachten, wenn die Funktion der Sinne irgendwie gestört wurde¹⁶. Die Reaktion des Körpers bei der Nutzung einer VR-Brille ähnelt daher der Reaktion auf eine Vergiftung. Der Mensch reagiert ganz unabsichtlich mit Unwohlsein und Übelkeit. Diese Simulatorkrankheit¹⁷ entfaltet aber nur dann ihre krankhafte Wirkung, wenn die Latenzzeit, wie von Pöppel vorhergesagt, nicht unterhalb von 20 ms gedrückt werden kann [48]¹⁸. Es ist wohl so, dass die Wahrnehmung der zeitlichen Latenz mit längerer Störungsdauer auch immer deutlicher auf den Probanden wirkt. Man kann daher wohl ohne Übertreibung von einer temporalen Divergenz zu sprechen.

Ein weiteres Problem, welches beim Sehen mit 3D-Brille auftritt, ist der Konflikt zwischen Akkommodation und Konvergenz. Damit ist folgendes gemeint. Das natürliche Sehen mit beiden Augen nutzt die Einwärtsdrehung der Augen auf einen gemeinsamen Fixationspunkt (Konvergenz). Ganz unwillkürlich richtet sich gleichzeitig mit der Konvergenz auch der Fokus auf eben diesen Punkt. Dadurch wird die Anpassung der Brennweite der Augenlinsen mittels Kontraktion der Augenmuskeln zur Veränderung der Krümmungsradien sowie der Mittendicke erzwungen. In der Folge kann der fixierte Punkt wieder scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Akkommodation und Konvergenz sind gemeinsam mit dem Pupillendurchmesser zur Naheinstellungstrias verbunden. Dadurch verbessert sich bei Fokussierung naher Objekte neben der Abbildung¹⁹ auf der Retina auch die Schärfentiefe. Beim stereoskopischen Sehen funktioniert diese ursprüngliche Verknüpfung nicht mehr. Wenn beispielsweise ein 3D-Objekt bei stereoskopischer Darstellung scheinbar weit vor oder hinter dem 3D-Display entsteht, konvergieren beide Augen unwillkürlich auf dieses illusorische Luftbild. Die Naheinstellungsverknüpfung zwingt nun auch die Akkommodation, sich auf eben diesen Punkt zu richten. Das verfehlt aber seine übliche Wirkung, da sich der Bildschirm nicht am Konvergenzpunkt befindet. Das Auge kann so keine scharfe Abbildung erzeugen. Die Wahrnehmung hat, um Doppelbilder zu vermeiden, einen zwanghaften Drang zur Fusion. Dieser Fusionszwang erzwingt nun auch eine geeignete Konvergenzstellung der Augen. Damit ist die natürliche Kopplung des Sehvorganges gestört. Das hat auf ungeübte 3D-Konsumenten eine ungewohnte Wirkung, das Sehen wird dann häufig als anstrengend wahrgenommen.

¹⁶Was z. B. bei einer Vergiftung oder übermäßigen Alkoholgenuss der Fall ist.

¹⁷Simulation Sickness, s. z. B. [47].

¹⁸DiZio und Lackner ermitteln 19 ms.

¹⁹Der Fixationspunkt wird im Punkt des schärfsten Sehens abgebildet.

4.4 Stereoskope

Ein Guckkasten für zwei Augen

Die Wahrnehmung eines räumlichen Effektes durch die Abbildung unterschiedlicher Perspektiven erfordert die Zuordnung eines Bildes zu dem dafür bestimmten Auge. Sieht das Auge aber ein Bild, was nicht für dieses Auge bestimmt ist, so entsteht ein falscher 3D-Eindruck. Da unter keinen Umständen ein falscher Eindruck entstehen soll, müssen geeignete Maßnahmen zur Bildtrennung und Augenzuordnung ergriffen werden.

Eine überraschende Erkenntnis aus der Geschichte der darstellenden Optik ist die Tatsache, dass erst im 19. Jahrhundert ein Instrument erfunden wurde, mit dem die dreidimensionale Wahrnehmung gezielt durch die Darstellung von Perspektivbildern provoziert werden konnte. Bereits in der Antike hatten sich Philosophen wie Empedokles, Euklid oder Aristoteles mit dem beidäugigen Sehen beschäftigt. Witelo, Alhazen und Kepler, immerhin die renommiertesten Optiker ihrer Zeit, hatten sogar Zeichnungen angefertigt, auf denen die unterschiedliche Lage der Netzhautbilder und damit die Grundlage des räumlichen Sehens illustriert wurde. Selbst das Universalgenie da Vinci konnte offenbar diesen Zusammenhang nicht erkennen, obgleich diese Entdeckung aufgrund seiner Kenntnisse von Perspektive und Abbildung durchaus im Bereich des Möglichen gewesen wäre²⁰. Erst 1838 beschrieb der englische Physiker Wheatstone das Phänomen des binokularen Sehens auch als eine Funktion der Abbildung zweier unterschiedlicher Perspektiven [40]. Wheatstone bezog sich in seiner Untersuchung auf da Vincis „Trattato della pittura“ [51] und wagte die These, da Vinci könnte die Abweichung der Netzhautbilder in den Betrachteraugen bemerkt haben, wenn er einen Würfel anstatt der von ihm bevorzugten Kugel verwendet hätte. Wheatstone entwickelte zur Überprüfung seiner binokularen Sehtheorie ein Instrument, dem er den Namen „Stereoskop“²¹ verpasste. Dieser Name wird bis heute für Geräte verwendet, die einen 3D-Effekt durch „Vorspiegelung falscher Tatsachen“, also durch die Zuordnung verschiedener Perspektivbilder zu den Augen des Beobachters. Wheatstone verwendete tatsächlich Spiegel zur Abbildung der Perspektivbilder auf einen Spiegel, der die Perspektiven in die Augen leitet. Im Bild Abb. 4.8 ist Wheatstones Spiegelstereoskop in Funktion abgebildet. Der Betrachter sieht über die kleinen Spiegel auf das links und rechts von ihm angebrachte Bildpaar.

²⁰Abgesehen von dem Bildpaar der Mona Lisa: Das Portrait der Mona Lisa existiert in doppelter Ausfertigung (ein Gemälde im Prado in Madrid, ein weiteres im Louvre in Paris); zwar beinahe identisch, doch mit kleinen Unterschieden. Carbon und Hesslinger zeigten 2013 in einer stereoskopischen Überlagerung die teilweise Raumwirkung des Bildpaars [49], lieferten aber keinen Beweis für die stereoskopische Absicht, sondern lediglich für eine (teilweise) perspektivische korrekte Unterschiedlichkeit (s. a. [50], S. 6).

²¹„The frequent reference I shall have occasion to make to this instrument, I will render it convenient to give it a specific name, I therefore propose that it be called a Stereoscope, to indicate its property of representing solid figures.“ (aus [40], S. 374).



Abb. 4.8 Dr. May sieht am King's College durch Wheatstones Stereoskop. (David Tett (2016), mit freundlicher Genehmigung von David Tett)

Mit Wheatstone Vorrichtung können auch großformatige Zeichnungen oder Fotografien in realistischer Darstellung räumlich abgebildet werden. Der 3D-Effekt wird deutlicher, wenn mit der natürlichen 3D-Szene künstliche Objekte kombiniert werden. Ein gutes Beispiel dazu ist die Aufnahme des Physikers Govi, den der Stereophotograph Dubosqe in einen künstlerischen Rahmen gesetzt hatte (Abb. 4.9). Der künstlich zu dem Bild kopierte Rahmen macht die Aufnahme zu einem der ersten „Mixed Reality“ Bilder, einer gemischten Szene aus realer und künstlicher Realität. In der Abbildung ist neben den Originalbildern ein Anaglyphenbild dargestellt. Bei 3D-Betrachtung scheint Prof. Govi in dem Rahmen zu sitzen, der nun wie ein Fenster in den virtuellen Raum wirkt.

Dabei war Dubosque nicht der erste Fotograf, der stereoskopische Aufnahmen für das wheatstonesche Stereoskop anfertigte. Schon im Jahr nach der Erfindung des Stereoskops experimentierte Wheatstone selbst mit den neu entstandenen fotografischen Verfahren Talbotypie²² und Daguerreotypie²³ (s. [57], S. 7). In Deutschland erarbeitete sich Moser etwa zur gleichen Zeit ein Verständnis zur Beurteilung der Raumbilder des Wheatstoneschen Stereoskops und bediente sich dazu der „Darstellung stereoscopischer Figuren auf photographischem Wege“ (in [58], S. 384).

Kohlans hatte schon 1677 seine „finsternen Kästlein“ nicht nur zur Beobachtung der Umgebung als Camera obscura, sondern auch als Objekt- oder Bildbetrachter konzipiert.

²²Auch „Kalotypie“ [52] bzw. „photogenetische Bilder“ [53], entwickelt von Talbot, der wohl heute bekannter für den Selbstabbildungseffekt bzw. Talbot Effekt ist (s. [54], S. 403–405).

²³Entwickelt von Daguerre [55] auf Basis der Niépces Heliografie [56].

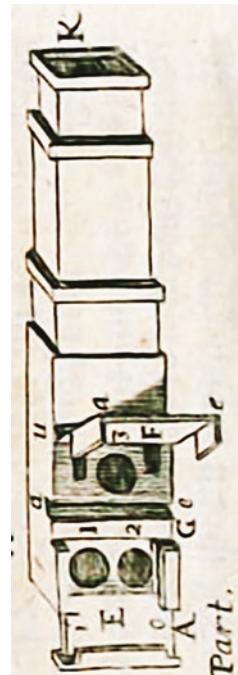


Abb. 4.9 Professor Gilberto Govi, Wheatstone Collection am King's College in London, K/PP107/8/47, 8/48, Stereofotografie von Carles Dubosque, entstanden zwischen 1862–1886. (Mit freundlicher Genehmigung der King's College London Archives)

Dieses „Panscopium“ war im Prinzip die Fortführung des Griendelschen Gerätes. Was Griendel unter einem Panascopium versteht, teilt der Optiker in seiner „Specificatio“ an Position 25. mit (aus [59], S. 97) (Abb. 4.10):

„Panscopium, meine neue Invention, ist zugleich ein Perspectiv, dadurch man mit zweyen Augen sehen kann, auch ein Microscopium, Polemoscopium, Helioscopium, Lucerna Optica: ein Wunder allerhand Spiegel-Werck, und seltenen Optischen Praesentierungen“

Abb. 4.10 Panscopium.
(Kohlhans (1677) aus [60]
Tafel VIII Kupfferstuck)



Ein Panscopium konnte zum Zwecke der Vergrößerung auch mit Linsen bestückt werden. Wheatstones Spiegelstereoskop war dagegen zum Zeitpunkt der Entstehung noch nicht einmal mit Okularlinsen ausgestattet (Abb. 4.11). Die Betrachtung der Bilder ohne Okular war bei diesem Aufbau aufgrund der mangelnden Vergrößerung der Bilder im Verhältnis zum Sehabstand zumindest mitunter schwierig, was wohl auch Wheatstone selbst aufgefallen ist.

In einer späteren Veröffentlichung [57] schlägt Wheatstone nun auch für ein Reflexionsstereoskop die Verwendung von Linsen zur Betrachtung des Stereobildes vor, wobei er auf die bereits eingeführte Verwendung von Linsen in Refraktionsstereoskopen durch Brewster hinweist ([57], S. 9). In Abb. 4.8 ist zu sehen, dass solche Linsen tatsächlich auch verwendet wurden. Brewster hatte in seinem Stereoskop prismatische Okularlinsen in Form einer geteilten Linse bereits zuvor verwendet [61] (s. a. Abb. 4.13).

Die prismatische Linsenform ist nicht zufällig gewählt, sondern hilft dem Betrachter, bei der Fokussierung des stereoskopischen Bildpaars. Die physiologische Naheinstellungstrias zwingt den Betrachter die Augen einwärts auf den Fokuspunkt zu drehen. Das Bildpaar der beiden Perspektivbilder liegt aber nicht am gleichen Ort vor, sondern in Brewsters Stereoskop in auf der Bildbühne links und rechts nebeneinander angebracht. Ein sehr schönes Beispiel dazu hat Brewster selbst gegeben (s. Abb. 4.12).

Durch die prismatische Linsenwirkung wird der Blick des Betrachters mühelos auf die Bildmitte des jeweiligen Perspektivbildes umgelenkt. Das virtuelle 3D-Bild entsteht an der Position der ursprünglichen Blickrichtung (s. Abb. 4.13).

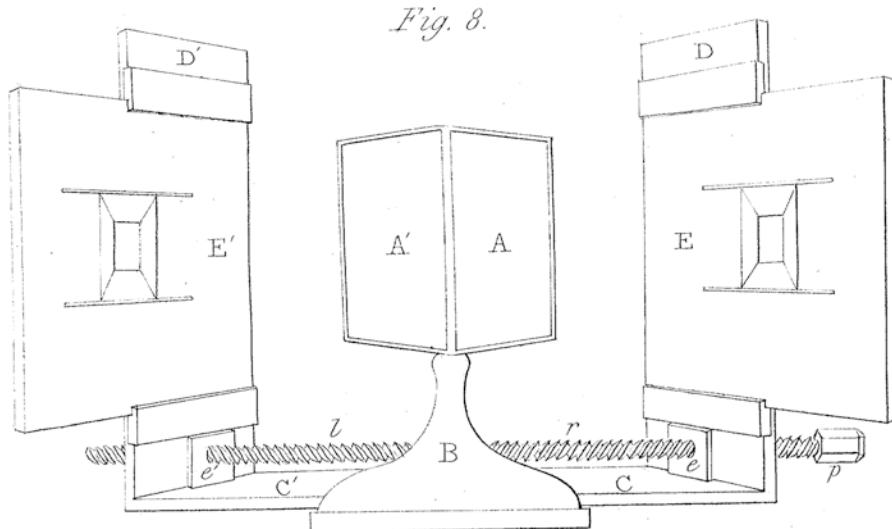


Abb. 4.11 Wheastones Stereoscope. (Charles Wheatstone (1838) aus [40], Fig. 8)

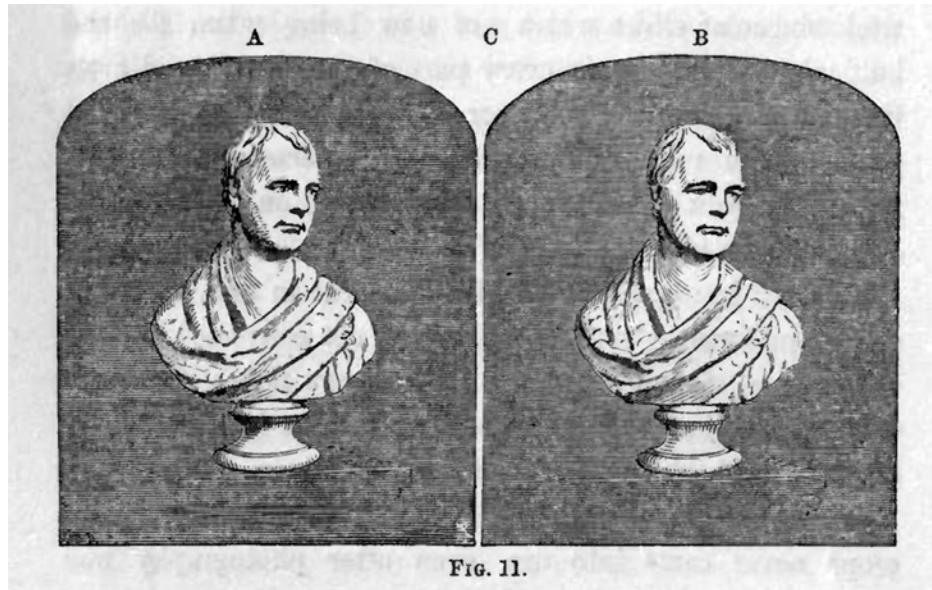


FIG. 11.

Abb. 4.12 Portrait of a Gentleman, stereoskopisches Bildpaar. (David Brewster (1856) aus [62], S. 64, Fig. 11)

Abb. 4.13 prismatische Linsen in Brewsters Stereoskop. (David Brewster (1856) aus [62], S. 74, Fig. 18)

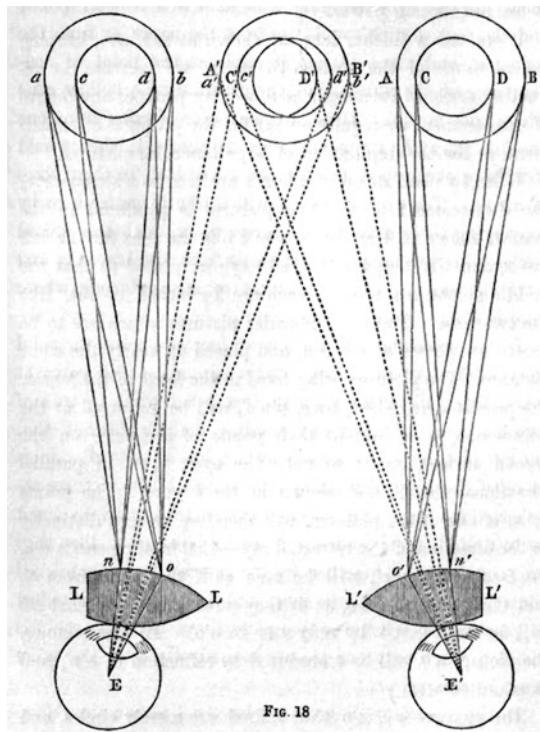


FIG. 18

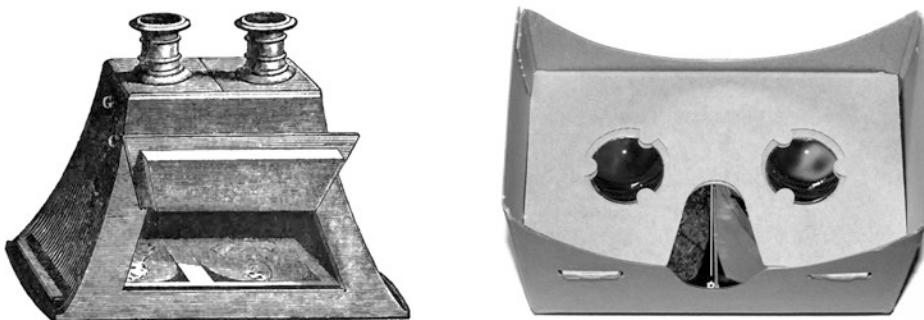


Abb. 4.14 Stereoskop-Vergleich. (Brewster (1856) aus [62], S. 67, Fig. 14, Grasnick (2019))

Durch die Lupenwirkung der Linsen kann das Brewstersche Stereoskop sehr klein und kompakt sein. Diese Bauform wurde bis heute kaum verbessert und stellt gewissermaßen den Urtyp heutiger VR-Brillen dar. In einem direkten Vergleich des historischen Brewster-Stereoskops (Abb. 4.14 links) mit einem heute weitverbreiteten Cardboard-Stereoskop (Abb. 4.14 rechts).

Im Prinzip sind nur zwei Dinge notwendig: Okularlinsen und ein Stereobild. Der offensichtliche Unterschied zwischen einem Brewster-Stereoskop und einem aktuellen Stereoskop liegt in der Art der Bilddarstellung. Verwendete Brewster dafür noch Zeichnungen und später Fotografien, so nimmt man heute dafür Displays und kann so den selbsttätig erleuchteten Bildinhalt elegant wechseln. Der maßgebliche Unterschied liegt aber in dem, was man nicht sieht. Die Verwendung des Displays eines Mobiltelefons geht mit der Präsenz vieler Sensoren einher. Ein aktuelles Smartphone erkennt nicht nur seine eigene Position oder die Himmelsrichtung, in die es gehalten wird, sondern auch Beschleunigung und Vibration. Damit kann man nun das Stereobild anhand der Lage einrichten. Man erhält so also ein lageadaptives Stereoskop²⁴.

Die Okulare des Stereoskops und müssen zur Betrachtung des 3D-Bildes damals wie heute eng an die Augen des Betrachters gepresst werden. Die Lupenwirkung der Linsen führt dabei zu einem virtuellen Bild. Schon früh war man daran interessiert, diese eingeschränkte Sicht zu erweitern, um das Stereoskop auch für eine weitere Betrachtungsentfernung und für ein größeres Publikum nutzen zu können. Wieder war es Maxwell, der dazu eine Idee hatte. Maxwell bildete mit seinem „Real Image Stereoscope“

²⁴Nachfolgend sind einige Vertreter solcher lageadaptiven Stereoskope genannt (mit oder ohne Telefon): z. B. Oculus Rift, HTC Vive, Sony Playstation VR, Samsung Gear VR, Zeiss VR One, Google Cardboard,

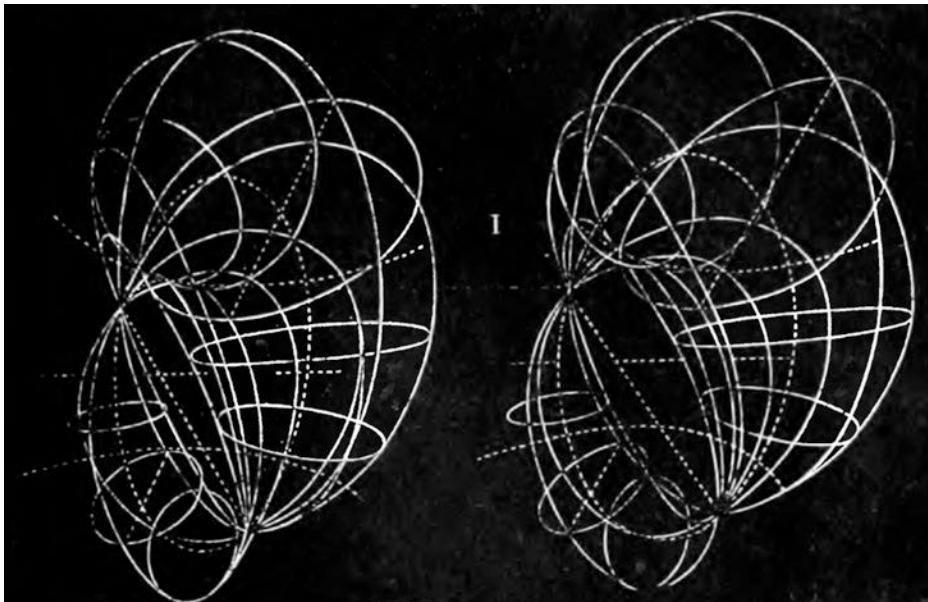


Abb. 4.15 Hörnerpaar-Zyklide. (James Clerk Maxwell (1890) aus [63], S. 159, Plate XI, Fig. 1)

das Stereobild zunächst über zwei Sammellinsen als reales Bild ab. In einem zweiten Abbildungsschritt wird eine zweite größere²⁵ Feldlinse in der Bildebene platziert. Ein Betrachter kann so etwa 50–60 cm vor der Linse stehen und dennoch ohne Hilfsmittel ein echtes dreidimensionales Bild wahrnehmen, womit ein autostereoskopisches Display beschrieben wäre (s. [63], S. 148). Maxwell nutzte dieses freiäugige Stereoskop zur Darstellung seiner Zykliden, den ringförmiger Flächen und Gebilden im dreidimensionalen Raum. Und das macht absolut Sinn. In Abb. 4.15 ist eine Zeichnung einer solchen Zyklide dargestellt. Als flaches Bild betrachtet, ist das Gebilde kaum verständlich und scheint nur eine wirre Ansammlung von Kurven darzustellen. Im Stereoskop offenbart das Bild seine räumliche Struktur. Damit lässt sich nun auch der von Maxwell gewählte Namen „Hörnerpaar“ erklären.

Ein Stereoskop muss nicht immer zwingend auf dem Tisch stehen, oder am Kopf getragen werden. Schon Brewster hatte an der Wand zu montierende oder in der Hand zu haltende Stereoskope skizziert (Abb. 4.16).

Interessant scheint hier vor allem die Brille. Eine stereoskopische Brille kann in der Hand gehalten werden und ist in der Herstellung preiswert. Das macht sie zu einem geeigneten Kandidaten zur Beilage in Zeitschriften oder Büchern. Die von Brewster eingeführte Darstellung des Stereobildes, bei dem beide Bilder nebeneinander (Seite an Seite bzw. Side-by-Side) angeordnet sind, ist naheliegend, aber nicht zwingend. Es

²⁵Bei Maxwell sind das 3 Zoll, als etwas weniger als 8 cm.

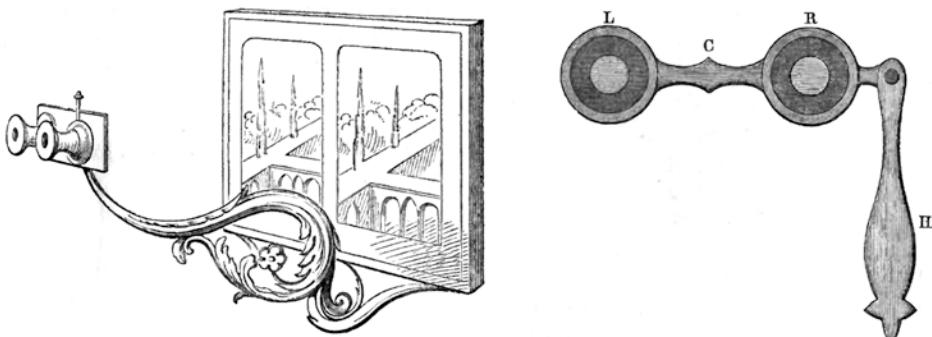


Abb. 4.16 Wand- und Hand-Stereoskope. (David Brewster (1856) aus [62], S. 69, Fig. 15 u. S. 70, Fig. 17)

spricht grundsätzlich nichts dagegen, die Bilder auch übereinander (Über- und Unter-einander bzw. Top-Down) zu platzieren. Eine solche Bildgestaltung hatten sich drei Wissenschaftler der Universität Hohenheim überlegt und in einem wirklich sehenswerten Buch präsentiert [64]. Dort sind auf mehreren Seiten Makroaufnahmen von Tieren, Pflanzen und Mineralien dargestellt, die man mit dem KMQ-Sichtgerät dreidimensional betrachten kann. Die Nachnamen Entwickler Christoph Koschnitzke, Rainer Mehnert und Peter Quick gaben dem Verfahren den Namen „KMQ“. Im Buch zeigt sich auch ein Vorteil dieses Sichtgerätes. Wollte man die Einzelbilder im Breitbildformat in einem Buch oder einer Zeitschrift auf einer Seite nebeneinander darstellen, würde man ein sehr breites, ungewöhnliches Seitenformat benötigen. Bei einer Über-und-Unter-Anordnung passen auf eine DIN A4-Seite ohne weiteres zwei volle A5-Seiten. Das auf dem Titel aufgedruckte Versprechen einer „Weltneuheit“ ist allerdings ein recht starkes Statement.

Der amerikanische Offizier Bernier hatte schon kurz nach dem zweiten Weltkrieg auf der Wright-Patterson Air Force Base in Dayton, Ohio, ein „Stereoscopic Photographic Department“ aufgebaut und dort ein solches Format vorgestellt. Dieses Verfahren wurde nicht nur beim Militär genutzt, sondern von Warner Bros. Entertainment und Paramount Pictures auch für das 3D-Kino der 50er und 60er Jahre. Das Bildformat des Films in Berniers System war bereits, ebenso wie im deutlich späteren KMQ-System, ein abwechselndes linkes und rechtes Bild in voller Größe (übereinander). Daraus leitet sich auch der von Bernier gewählte Name „Alternate-Frame Technique“ (s. [65], S. 602) ab²⁶.

Um ein Stereoskop für ein horizontal angeordnetes Stereobildpaar in eines für eine vertikales Bildpaar zu verwandeln genügt es, die Prismen des Betrachters lediglich um 90° zu drehen. Die Einfachheit der prismatischen Stereo-Lorgnette²⁷ ist gleichzeitig auch

²⁶Wobei die Betrachtung in Berniers System eine Polarisationsbrille voraussetzte, über die noch später zu sprechen sein wird.

²⁷Eine Lorgnette ist bügellose, an einem Stiel vor die Augen zu haltende Brille.

ein Problem. Das Hilfsmittel kann zwar recht einfach vor die Augen gehalten oder als Brille aufgesetzt werden, jedoch ist für die korrekte Wahrnehmung des 3D-Bildes ein ganz bestimmter Abstand zum Bild einzuhalten. Das gelingt nicht immer gut, deshalb wurde in den 1990er Jahren in den USA ein System mit einer Spiegelumlenkung vorgestellt, das einfach aufgrund der Größe des Bildfeldes etwas toleranter gegenüber Fehlanpassungen in der Entfernung war [66]. Aber auch der „View Magic“-Betrachter hatte nicht den ganz großen Erfolg.

4.5 3D-Brillen

Bildtrennung zum Aufsetzen

Es ist nicht immer notwendig, den stereoskopischen Effekt durch das Erzwingen einer bestimmten Blickrichtung des Betrachters zu erzeugen. Mit bestimmten Verfahren können beide Bilder auch am gleichen Ort erzeugt werden und mit einer geeigneten Brille beim Betrachten wieder in die beiden Einzelbilder zerlegt werden. Dabei können die Okulare des Stereoskops und die Bildbühne räumlich stark voneinander getrennt werden. Die Bildtrennung in linkes und rechtes Bild wird dabei von unterschiedlichen 3D-Filtern oder Optiken bewerkstelligt.

In der Anfangszeit der Stereoskopie bemerkte und notierte der deutsche Physiklehrer Rollmann bei der Beschäftigung mit der stereoskopischen Fusion ohne Stereoskop die Einfarbigkeit eines Mischbildes. Rollmann hatte mit bloßen Augen ein rotes und ein grünes Bild fusioniert und neben dem räumlichen Effekt noch etwas anderes wahrgenommen. Das Raumbild erschien ihm grau [67]. Aus dieser Beobachtung entwickelt Rollmann ein Farbenstereoskop, bei dem die einzelnen Bilder durch die jeweiligen Farben aus dem Gesamtbild der Doppelzeichnung extrahiert werden [68]. Die Separation der zweifarbig Zeichnung (Rollmann nennt als Farben blau und gelb) erfolgte bei Rollmann über ein rotes und ein blaues Glas.

Etwa zur gleichen Zeit wie Rollmann experimentierte auch der französische Physiklehrer d’Almeida mit der Stereoskopie. d’Almeida baute sich dazu aber ein echtes Gerät. Mittels zweier Projektoren projizierte d’Almeida zwei einzelne Stereobilder auf die identische Position einer Leinwand [69]. Vor jedem Projektionsobjektiv war ein Farbfilter angebracht. Vor dem einem Objektiv war ein roter Filter, vor dem anderen ein grüner Filter montiert. Die Betrachter nutzten die gleichen Farbfilter, um das entsprechende Auge jeweils mit rot oder grün zu verdecken. Damit lässt sich ganz einfach auch eine Brille ausstatten. Interessant sind die beiden letzten Abschnitte von d’Almaidas Text. Er schlägt zunächst vor, auch vollfarbige Bilder zu verwenden, die der Betrachter durch eine drehende Scheibe mit abwechselnden Öffnungen betrachtet. Eine synchrone zweite Scheibe verdeckt und öffnet die Objektive mit dem passenden Anteil des Stereobildpaars. Damit ist nichts weniger als eine mechanische Shutter-Anordnung beschrieben. Zum Schluss teilt er noch mit, dass er an einer Vorrichtung arbeitet, seine Idee der mit

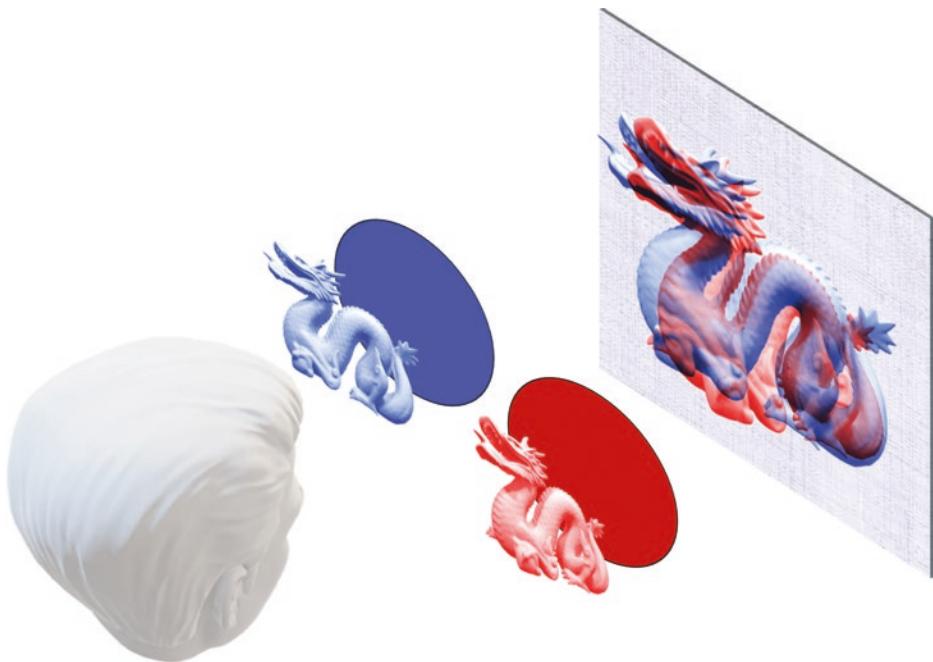


Abb. 4.17 Darstellung von Anaglyphen, Grasnick (2019)

einem Phenakistiskop zu kombinieren. Damit waren dann zumindest kurze, aber vor allem bewegte 3D-Szenen möglich.

Es ist allerdings erst Du Hauron, den noch heute gebräuchlichen Namen „Anaglyph²⁸“ einführt [70]. Du Hauron hat sicherlich nicht nur mit der Namensgebung einen Beitrag geleistet, sondern ganz besonders mit der praktischen Umsetzung seiner Farbfotografie und -stereoskopie die Verbreitung dieser Technik unterstützt.

Aufgrund der Einfachheit wird die Anaglyphentechnik bis heute eingesetzt. Die notwendigen Farbfilter lassen sich billig herstellen, die stereoskopischen Bilder sind einfach zu drucken und lassen sich an jedem Monitor darstellen. Man benötigt nur die preiswerte 3D-Brille, deren Brillengläsern mit verschiedenen, idealerweise komplementären Farbfiltern. In der Illustration in Abb. 4.17 ist ein rot-blaues Filterpaar dargestellt. Die jeweiligen Filter lassen immer nur denjenigen Bildanteil passieren, der für das betreffende Auge bestimmt ist.

Ein Anaglyph, das am LC-Monitor betrachtet werden soll, würde idealerweise aus den Grundfarben der Subpixel zusammengesetzt. Bei den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB) entspricht die Anzahl der möglichen Varianten (Permutationen) der Fakultät von drei²⁹.

²⁸Aus griech. *ana* = auf + *glypho* = darstellen, also etwa aufeinander darstellen.

²⁹Das Produkt aller Zahlen kleiner und gleich der Zahl, die permutiert werden soll ($3! = 6$).

Da eine Farbe oder ein Farbanteil nicht gleichermaßen für den rechten und linken Bildkanal verwendet werden kann, ergeben sich die sechs möglichen Kombinationen für eine Anaglyphenbrille am RGB-LCD wie folgt:

- Rot – Grün
- Rot – Blau
- Rot – Cyan
- Grün – Blau
- Grün – Magenta
- Blau – Gelb

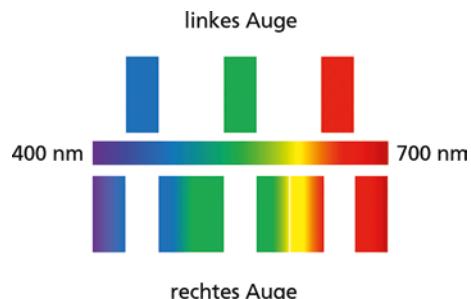
Dabei sind die Kombinationen unter Nutzung der Komplementärfarben (Rot – Cyan, Grün – Magenta, Blau – Gelb) zu bevorzugen, da dadurch alle Subpixel benutzt werden. In der Wahrnehmung der Mischfarbe ergibt sich dann das von Rollmann erwähnte „lebhafte“ Grau. Unglücklicherweise führen die Farbfilter aber trotzdem, insbesondere beim Versuch einer Farbdarstellung, zu einer Verfälschung der Farben und zur Verringerung der Helligkeit (worauf auch schon Rollmann hinwies).

Bei d'Almeida findet sich auch ein Hinweis auf die Lösung des Farbproblems. D'Almeida erklärt, dass die beiden farbigen Gläser nicht die gleichen Anteile des Spektrums gemeinsam haben dürfen [69]. Das ist sicherlich etwas spitzfindig, aber im Prinzip beschreibt es das, was der Dolby-3D-Filter im 3D-Kino macht. Dolby nutzt die Technik der deutschen Daimler-Tochter Infitec. Die Entwickler nutzen auch dort Farbfilter, allerdings ist jedes Glas immer gleichzeitig für verschiedene schmale Bereiche (Bänder) durchlässig. Ein Bild soll das illustrieren. In der Abb. 4.18 ist in der Mitte der gesamte sichtbare Bereich von 400 bis 700 nm Wellenlänge dargestellt. Darüber befinden sich die schmalbandigen RGB-Filter für das linke Auge, darunter die Bandfilter für das rechte Auge.

Wenn es ideal gemacht wird, ergänzen sich beide Filter wieder zum vollen Spektrum und die maximal mögliche Helligkeit kann die Filter passieren.

Diese Filter sind nun deutlich besser, als eine preiswerte Rot-Grün-Brille, dafür eben auch deutlich teurer. Der Vorteil dieser Brillen gegenüber der Polarisationstechnik ist der mögliche Verzicht auf eine spezielle Leinwand, da für die Erhaltung des Polarisationszustandes nach der Reflexion der projizierten Bilder eine spezielle Leinwand verwendet werden muss.

Abb. 4.18 Infitec-Anaglyph.
(Grasnick (2019) nach [71])



Und das ist die Überleitung zur Polarisation.

Neben der Farbe und Intensität kann das Licht noch eine weitere Eigenschaft haben: die Polarisation.

Die Polarisation tritt in der Natur bei der ganz nebenläufig auf, z. B. bei der Reflexion des Lichtes auf einer Wasseroberfläche oder bei der Streuung des Lichtes an einem leicht bewölkten Himmel. Manche Lebewesen können die Polarisation zur Navigation nutzen³⁰, der Mensch benötigt dazu Hilfsmittel. Ob die Sonnensteine der Wikinger dazu ausreichten, bleibt umstritten [73]. Unumstritten ist jedoch, dass die Wikinger doppelbrechende Materialien in ihren Sonnensteinen verwendeten. Ein besonders klares und doppelbrechendes Material ist der isländische Kristall³¹. Aufgrund seiner ungewöhnlichen optischen Eigenschaften war dieser Kristall durchaus auch Gegenstand ernsthafter Untersuchungen. Bartholin beschrieb 1670 seine Experimente [74], die Huygens schon einige Jahre später mit der Wellennatur des Lichtes erklären konnte [75]. Malus entdeckte darüber hinaus die Polarisation durch Reflexion [76] und erfand auch die Bezeichnung „Polarisation“ [77]. Malus eigentlicher Verdienst ist möglicherweise die mathematische Formulierung der Intensität des polarisierten Lichtes nach Durchtritt durch einen linearen Polarisator, die heute als das Gesetz von Malus³² bekannt ist. Diese einfache Formel ist auch heute noch völlig ausreichend, um die Stellung der Polarisatoren für eine 3D-Anwendung zu definieren. Erste Versuche, die Polarisation für stereoskopische Projektionen zu nutzen, gab es aber erst zum Ende des 19. Jhdts. Der englische Optiker Anderton nutzte die Möglichkeiten seiner Zeit und verwendete für die Polarisatoren der Projektoren und Analysatoren der Brille verfügbare Technik [78]. Gerade bei der Brille sind alle von Anderton vorgeschlagenen Varianten, wie beispielsweise Nicolische Prismen, Turmalinkristalle oder gar ein Stapel planparalleler Platten, schwer und kostspielig. Aus Herapaths künstlichem Turmalin [79], der sich damals bereits in größeren Platten herstellen ließ [80], hätte man sicherlich Polarisatoren fabrizieren können. Das scheint Anderton aber nicht bekannt gewesen zu sein. So dauerte es noch etwas, bis der Mineraloge Bernauer den Produktionsprozess deutlich vereinfachte. Bernauer ließ dafür die Herapathit-Kristalle zwischen zwei Glasplatten kristallisieren [81]. Carl Zeiss in Jena nutzte Bernauers Erfindung zur Herstellung von Polarisatoren unter den Handelsnamen Herotar und Bernotar [82], die ab 1937 auch für den 3D-Film³³ genutzt wurden [85]. Bekannter, als die Polfilter von Bernauer sind aber die von Polaroid. Der

³⁰Wie Frisch bemerkte, navigieren die Bienen u. a. auch nach Polarisation [72].

³¹Auch „Doppelstein“ oder „Doppelspat(h)“, heute „Calcit“ oder „Kalzit“.

³²Die einen linearen Polarisator passierende Intensität ist das Produkt aus der ursprünglichen Intensität, multipliziert mit dem quadrierten Cosinus des Drehwinkels. Voraussetzung ist dabei, dass die ursprüngliche Intensität bereits linear polarisiert ist.

³³Werbefilm der Volksfürsorge-Lebensversicherung: „Zum Greifen nah“ von Curt A. Engel und Karl Schröder, Uraufführung im Berliner Ufa Palast 1937 [83], Wiederaufführung Berlinale 1980 [84].

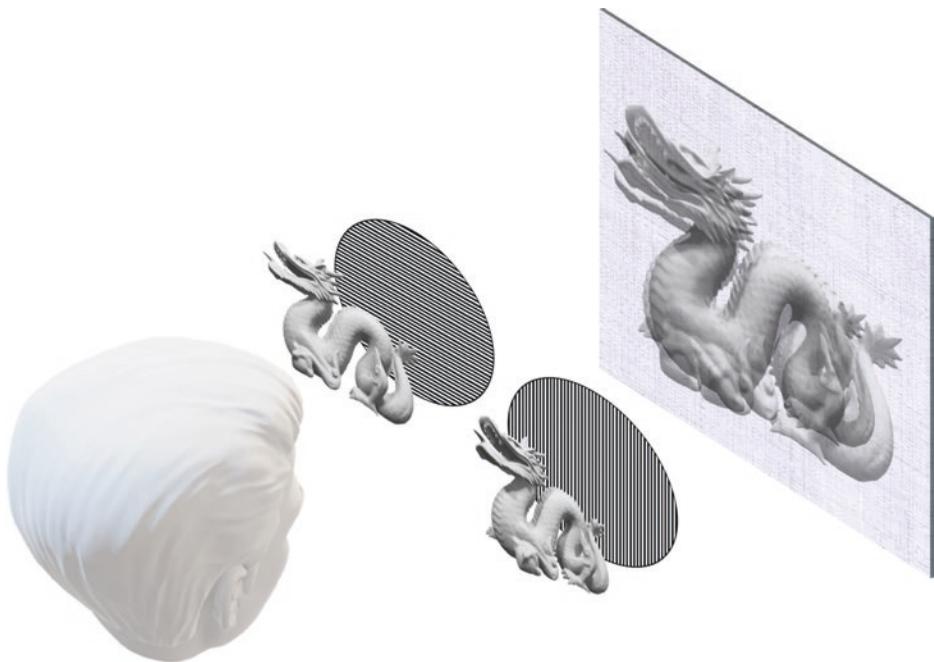


Abb. 4.19 Betrachtung mit Polarisationsfilter, Grasnick (2019)

Firmengründer Land arbeitete zeitgleich mit Bernauer an der Entwicklung großformatiger Polarisatoren. Anders als bei Bernauer richtete Land die Herapathit-Nadeln durch elektrische oder mechanische Krafteinwirkung direkt im Substrat aus und konnte so auf Glasplatten verzichten [86]. Diese Polarisatoren wurden ab 1936 für den 3D-Film benutzt [87] und stellten früh eine Alternative zu den bis dahin verwendeten Anaglyphen dar. Auch Norling, der mit seinem 3D-Anaglyph-Kurzfilm „Audioscopiks³⁴“ sogar für den Oscar nominiert war, erkannte die Möglichkeit zur 3D-Farbfilmdarstellung mit Polarisatoren und stellte mit Lands Polaroids einen 12minütigen Film für die Weltausstellung 1939 auf Basis der Polarisierung vor [89]. Die Polaroid-Polarisatoren ermöglichten die Herstellung preiswerter Brillen und wurden daher auch zunehmend im 3D-Kino eingesetzt. Die Betrachtung des Filmes war dabei ebenso einfach, wie beim Anaglyphenfilm. Die beiden Einzelbilder werden auf die Leinwand projiziert und mit einer Polbrille betrachtet (Abb. 4.19).

Neben der bereits erwähnten Notwendigkeit für eine spezielle Leinwand, wurden auch zwei Projektoren benötigt. Bernier löste das Problem für sein Alternating-Frame-Verfahren, indem er den Polfilter vor dem Projektor mit dem jeweilig angezeigten

³⁴Nach Norlings eigener Beschreibung ein 3D-Tonfilm ([88], S. 285), ein Phonofilm auf Basis des Plastigramms (s. a. [89], S. 612).

Bild drehte (s. [65], S. 603). Also eine Stellung für das linke Bild, passend gedreht für das rechte. Die Drehung muss nun zu den linearen Polarisationsfiltern in der Brille des Betrachters passen, die 90 Grad gegeneinander verdreht sind. Diese Brillen funktionieren aber nur gut, solange der Besucher seinen Kopf absolut gerade hält. Neigt er den Kopf zu Seite, schlägt das Gesetz von Malus unerbittlich zu. Die Polfilter blockieren das unerwünschte Bild nicht mehr vollständig, sondern lassen einen Teil des „falschen“ Bildes in das Auge treten. Die Kanaltrennung sinkt, das 3D-Bild wird schlechter [90]. Land hatte diesen Sachverhalt schon 1937 vollständig erkannt und eine Lösung vorgeschlagen³⁵ [91]. Allerdings vergingen nochmals fast 70 Jahre bis die Firma RealD Lands Idee umsetzte und so einem breiten Publikum bekannt machte [92]. RealD übernahm das kleine Unternehmen StereoGraphics des amerikanischen Stereofilmers Lipton und übernahm damit auch dessen Idee der aktiven Drehung des Polarisationszustandes. Mit dem Aufkommen der Flüssigkristalle war eine Technologie vorhanden, die nicht mehr (wie noch bei Bernier) die mechanische Drehung der Polfilter verlangte, sondern eine elegante elektrooptische Methode ermöglichte. Lipton u. a. schlugen vor, den Polarisationswinkel über einen zeitlich getakteten Shutter zu drehen [93]. Dieser, bei StereoGraphics mit „ZScreen“ bezeichnete Modulator [94] ist im Wesentlichen nichts anderes als ein LCD ohne Polarisatoren. Polarisiertes Licht wird durch die Kristalle in Abhängigkeit von der angelegten Spannung um einen bestimmten Winkel gedreht. So kann der Polarisationswinkel in Abhängigkeit vom jeweils angezeigten Bild verändert werden. Da die Analysatoren in der RealD-Brille aus zirkulären Polarisatoren bestehen, muss das Licht des ZScreen ebenfalls zirkular polarisiert sein. Das funktioniert auch dort mit einer Verzögerungsplatte (s. [93]). Diese Art der Polarisationsdrehung eignet sich sowohl für Projektion als auch für Displays. Bei einem Projektor wird der Modulator einfach vor das Objektiv gesetzt und mit dem Film synchronisiert. Für ein Anwendung als Bildschirmvorsatz ergeben sich zwei weitere Forderungen. Die offensichtliche Notwendigkeit ist, dass Modulator mindestens die Größe des Displays aufweisen muss. Weniger offensichtlich ist die zweite Forderung. Der Bildaufbau und Bildwechsel muss schnell erfolgen, um nicht als Flimmern wahrgenommen zu werden. Zur Erinnerung: In der Anfangszeit der LCD-Technik war der Bildaufbau langsam und dadurch auch die Bildwiederholrate gering. Um den Bildwechsel nicht mehr wahrzunehmen und ein Bildflimmern zu vermeiden, muss das Bild mindestens mit einer Bildwiederholrate von 50 Bildern pro Sekunde³⁶ dargestellt werden. Das gilt aber nur für ein einzelnes Bild. Im Falle einer 3D-Darstellung müssen beide Bilder abwechselnd dargestellt werden und damit steigt das Erfordernis auf die doppelte Frequenz. Nun wären es sogar 100 Hz, die dargestellt werden müssen. Das war lange Zeit mit Flüssigkristallanzeigen unmöglich.

³⁵Er schlug vor, sogenannte Verzögerungsplatten in der Dicke von $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge ($\lambda/4$ -Plättchen) zur Erzeugung zirkularer Polarisation zu nutzen.

³⁶1/s = Hz (Hertz).

Zur Lösung dieses Problems hatte Faris ein „Mikro-Polarisator-Array“ vorgeschlagen [95]. Alle einzelnen Elemente eines solchen Arrays, die sowohl echte Polarisatoren als auch Verzögerungsplatten sein können, sind auf die Größe und Form der darunterliegenden Pixel abgestimmt. Die Anordnung der Elemente erfolgt immer alternierend in Reihen und Spalten oder in einem Schachbrett muster. Mikrostrukturierte Polarisationselemente werden für die 3D-Darstellung am LC-Bildschirm gern verwendet, da die Realisierung recht einfach ist. Wie schon erläutert, wird das Licht beim Durchgang durch ein LCD vollständig linear polarisiert. Damit benötigt man nur Verzögerungsplatten³⁷ bzw. -streifen, um die Polarisation zu zeilenweise abwechselnd zu drehen. Der Betrachter trägt eine passive Polarisationsbrille mit den zugehörigen verdrehten Polfiltern – fertig ist der 3D-Fernseher. Auch hier wird häufig noch eine $\lambda/4$ -Verzögerungsplatte eingesetzt, um wieder zirkular polarisiertes Licht zu haben. Dazu muss dann natürlich auch die Brille mit zirkularen Analysatoren ausgestattet sein. Man findet solche strukturierten Retarder in Bildschirmen und Fernsehern, die sich mit dem Titel „passives 3D“ schmücken, da im Monitor und in der Brille tatsächlich nur die Polfilter ohne jegliche elektrische Ansteuerung für den 3D-Effekt verantwortlich sind. JVC³⁸ verwendete für seine Filter die Bezeichnung „Xpol Circular“ [96], LG³⁹ den Namen „Film Patterned Retarder“ [97]. Durch die Nutzung der strukturierten Polarisatoren kann jetzt auch auf einem 3D-Fernseher ein 3D-Film nahezu in Kinoqualität geschaut werden (Abb. 4.20).

Das Aufsetzen von zusätzlichen Elementen vor die Pixel eines Bildschirms bringt aber nicht nur Vorteile. Zunächst war die Herstellung großformatiger strukturierter Polarisationslemente teuer. Dadurch wurde der Vorteil der preiswerten Brille wieder vernichtet. Mittlerweile konnte durch die Einführung gedruckter Strukturen [98] der Preis zwischenzeitlich deutlich verringert werden. Die notwendige Halbierung der nutzbaren Zeilen pro Halbbild kann mit der heutigen Bildschirmauflösung von 4k⁴⁰ oder mehr sicherlich ebenfalls verschmerzt werden. Immerhin reicht auch die halbe Auflösung, um dem den derzeitigen Fernsehbildstandard Full-HD⁴¹ zu erfüllen. Ein Problem, das aus dem geometrischen Aufbau des Displays herrührt, bleibt aber bestehen. Vor den Farbfiltern des LCDs sind physikalisch notwendige weitere Schichten angeordnet (Abdeckglas, Polarisationsfilter), die eine messbare Dicke aufweisen. Diese können insgesamt dünner als 1 mm sein [99], erzeugen aber trotzdem einen Abstand zwischen der bildgebenden LC-Schicht und dem Mikro-Polarisator-Array. Insbesondere aus kurzen Betrachtungsentfernnungen oder bei Betrachtung von oben oder unten ist die Überdeckung zwischen den alternierenden Bildzeilen und Polarisatoren nicht mehr ideal und führt zu

³⁷In diesem Fall sind es $\lambda/2$ -Plättchen, die keine zirkulare Polarisation erzeugen, sondern deren Richtung nur drehen.

³⁸Victor Company of Japan, Yokohama.

³⁹LG Electronics, Südkorea.

⁴⁰4k = 4000, Auflösung 3840 vertikale \times 2160 horizontale Pixel.

⁴¹Auflösung 1920 vertikale \times 1080 horizontale Pixel.

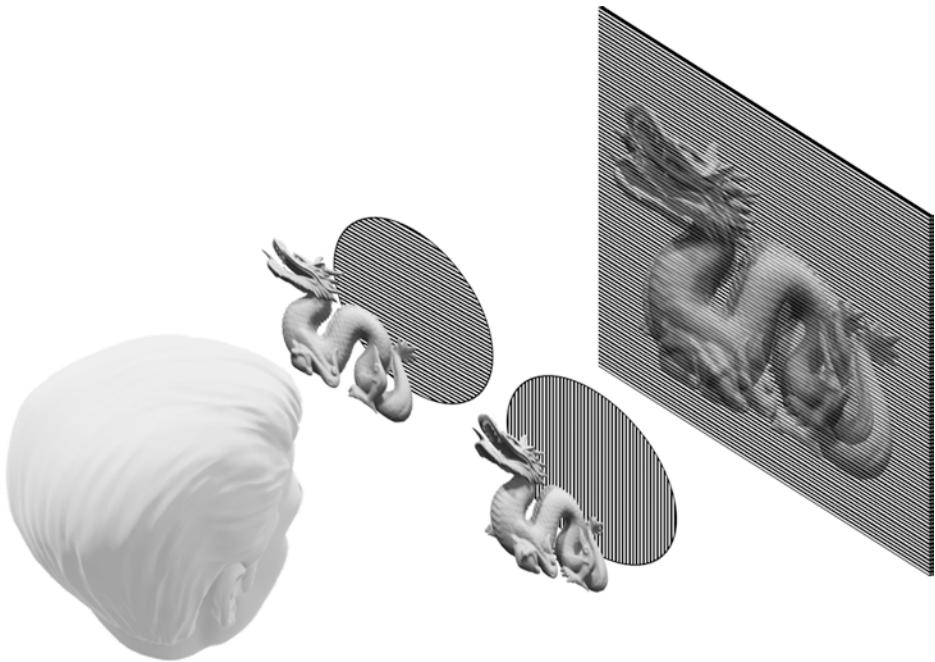


Abb. 4.20 Betrachtung strukturierter Polarisatoren, Grasnick (2019)

einer wahrnehmbaren Bildverschlechterung [100]. Das gibt auch JVC zu: „Betrachten Sie 3D-Bilder im empfohlenen Betrachtungsabstand. ... Die 3D-Effekte können sich unterscheiden, wenn der Bildschirm aus unterschiedlichen Winkel betrachtet wird“ [101].

Man kann diesen Parallaxenfehler vermeiden, indem man auf die zusätzlichen Polarisatoren verzichtet. Die Zuordnung der Bilder kann dann ebenfalls nicht mehr über Polarisation erfolgen. Eine Möglichkeit, die d’Almeida schon 1858 vorgeschlagen hatte [69], ist die zeitlich abwechselnde Verdeckung der Bilder. Es ist nicht bekannt, ob d’Almeida die von ihm angekündigten Experimente bis zu einem System weiterentwickelt hat. Das ist erst aus den 20er Jahren des 19. Jhdts. bekannt. Zu dieser Zeit setzte der Ingenieur Hammond die aus der Filmaufnahmetechnik bekannten rotierenden Verschlüsse⁴² für eine 3D-Projektion ein [102]. Das war zunächst ein guter Gedanke. Nun musste aber im Kino an jedem Sitz ein zum Projektor synchronisierter Verschluss in Form einer Brille angebracht werden. Das war ein erheblicher Aufwand, der aber tatsächlich einmal getätigt wurde. Das New Yorker Selwyn-Theatre wurde mit Hammonds „Televue“-Technik ausgestattet⁴³ und darin ein 3D-Film vorgeführt⁴⁴.

⁴²Die englische Bezeichnung für Verschluss ist Shutter.

⁴³Puchalski ermittelt die Zahl der Sitze ab 1918 mit 964 [103].

⁴⁴Televue Film „M.A.R.S.“ [104].

Es scheint verständlich, dass die aufwändige Technik sich nicht etablieren konnte und Hammonds Shutter sich nicht verbreitete. Es war wieder die LC-Technik, die eine Alternative zu den mechanischen Shuttern darstellte. Im Prinzip funktioniert der Shutter wie Liptons ZScreen. Ein polarisiertes Bild wird über den Modulator in die eine oder andere Polarisationsrichtung gedreht. Setzt man nun einen zweiten Polfilter direkt vor das LC, hat man wieder den Grundaufbau eines LCDs. Ein Shutter kann eine einfache Schadt-Helfrich-Zelle sein, bei der sich das Flüssigkristall zwischen zwei Polfiltern und transparenten Elektroden befindet. In der Nutzung als Shutter muss das LC nicht einmal strukturiert sein. Da man nur zwei Zustände über das gesamte Glas benötigt (nämlich On/Off), genügt ein einziger Pixel. Ein Brillenglas des Shutters stellt quasi den Verschluss eines Fotoapparates vor den Augen des Betrachters dar. Lipton nutzte seine Erfahrungen aus der Entwicklung elektrooptischer Verschlüsse und packte die Technik des ZScreens in eine 3D-Brille. Die StereoGraphics Shutter-Brille „CrystalEyes“ [105] war ein voller Erfolg und wird bis heute angeboten⁴⁵. Solche Flüssigkristall-Brillen wurden auch von anderen Firmen hergestellt⁴⁶. Bemerkenswert ist, dass auch im deutschen Sprachraum diese Brillen unter dem Begriff „3D-Shutterbrille“ oder einfach nur oder „Shutter-Brille“ verbreitet sind und nicht etwa unter der deutschen Bezeichnung „Verschluss-Brille“, die ehrlicherweise so auch nicht existiert.

Es ist wieder die Einfachheit des Systems, welche die Anwendung im Kino⁴⁷ und die Nutzung am heimischen 3D-Fernseher⁴⁸ erlaubt. Auch hier soll eine Abbildung die Funktion illustrieren. Die zeitliche Abfolge der Funktion (das Öffnen und Schließen der Shutter) ist nun in zwei Momenten nacheinander (in Abb. 4.21 oben und unten) dargestellt.

Es macht jetzt vielleicht Sinn, die beiden maßgeblichen Verfahren unserer Zeit kurz gegenüberzustellen. Ohne Zweifel eignen sich beide Systeme für die Vorführung eines 3D-Films im Kino oder das 3D-Fernseherlebnis zuhause. Der Unterschied liegt zunächst in der Darstellung des Bildes. Für die Polarisationsbrille wird das stereoskopische Bildpaar in Streifen zerlegt und diese auf dem Bildschirm wieder abwechselnd zusammengefügt. Es ist nun klar, dass jedes Bild nur die Hälfte der ursprünglichen Bildschirmauflösung haben kann. Für eine Shutterbrille wird immer ein ganzes Bild angezeigt, das aber nur mit einem Auge gesehen wird. Von der Auflösung ist der Shutter dem Polfilter also überlegen. Es ist aber so, dass für den 3D-Effekt die optischen „Verschlüsse“ der Brille abwechselnd geöffnet und geschlossen werden müssen. In der gleichen Zeit, bei der für die Polarisationsbrille nur ein Bild dargestellt wird, benötigt der Shutter zwei nacheinander. Wie schon gesagt, müssen Display und Shutter mit doppelter Frequenz arbeiten. Hier gewinnt die Polbrille.

⁴⁵Nun als RealD CrystalEyes.

⁴⁶Z. B. in Deutschland von ELSA als „REVELATOR“ [106].

⁴⁷Z. B. XPAND Shutterbrille [107].

⁴⁸Z. B. Samsung 3D-Active-Shutter-Brille [108].

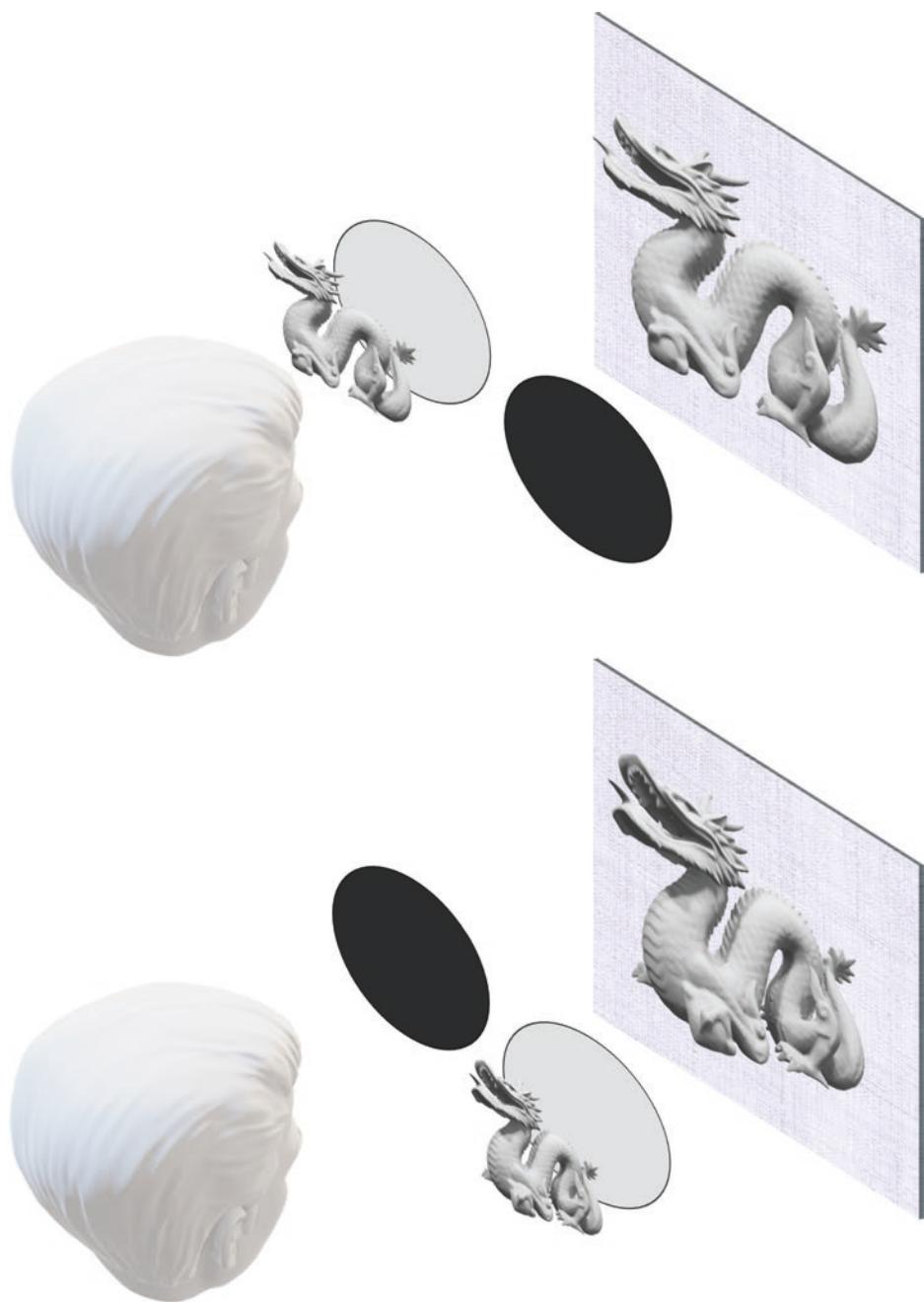


Abb. 4.21 Betrachtung mit Shutter, Grasnick (2019)

Im Prinzip kann man es auch mit Art der Bilddarstellung der beiden Einzelbilder des Stereobildes im Display (dem sogenannten Multiplexing) beschreiben. Bei dem Polfilter liegt ein räumliches Multiplexing vor, beim Shutter ist es ein zeitliches Multiplexing.

Das zeitliche Multiplexing ist auch für den Pulfrich-Effekt verantwortlich. Der nach dem Physiker Pulfrich benannte Effekt wurde aber zuerst vom Astronomen Wolf bemerkt. Und das kam so. Der Direktor der Heidelberger Sternwarte (Wolf) machte bei der Vermessung von Fixsternen die Beobachtung, dass die Sterne mitunter zu „schweben“ schienen [109]. Da Wolf den Stereokomparator der Firma Zeiss benutzte, um zwei zeitlich versetzte Aufnahmen zu vergleichen, fühlte der Zeiss-Mitarbeiter Pulfrich sich berufen, den Effekt zu untersuchen. Er reproduzierte die Beobachtung und entdeckte den (heute nach ihm benannten) „Pulfrich-Effekt“, den er „Zeitparallaxe“ nannte [110].

Die Raumwahrnehmung durch den Pulfrich-Effekt ergibt sich aus der Helligkeitsdifferenz der beider Netzhautbilder, die eine zeitliche verzögerte Wahrnehmung des abgedunkelten Bildes verursachen. Pulfrich beschreibt den Effekt so: „Die aus der Helligkeitsdifferenz der beiden Augen hervorgegangene Zeitdifferenz ... hat sich in eine Raumdifferenz ... umgewandelt ...“⁴⁹ ([110], S. 559). Auch hier liegt ein zeitliches Multiplexing vor.

Dass Pulfrichs Entdeckung hier erwähnt wird, liegt vor allem an den „Pulfrichbrillen“. Der maßgebliche Erfinder war der Toningenieur Beard, der diesen Effekt zur Betrachtung von Filmen am Fernsehschirm durch Umsetzung von „Querbewegung“⁵⁰ in ein stereoskopisches Bild nutzte [111]. Dabei wird ein Auge des Zuschauers verdunkelt, sodass ein bewegtes Objekt mit dem verdunkelten Auge später wahrgenommen wird. In Abhängigkeit von der Bewegung des Objektes oder der Kamera ergibt sich ein echter 3D-Effekt. Beards Technologie wurde von der Firma Nuoptix zunächst in den USA in den Markt gebracht [112]. Da für den 3D-Effekt weder eine besondere Aufnahmetechnik noch spezielle Wiedergabesysteme, sondern lediglich eine billige Pappbrille benötigt wurde, verbreitete sich die Technik schnell. Die einfachen Pulfrichbrillen wurden millionenfach verteilt und besonders für Werbung und Dokumentation eingesetzt. Das lag vor allem darin begründet, dass die fortwährende Bewegung oder Drehung im Film auf lange Dauer durchaus ermüdend ist. Man möchte sicherlich keinen Pulfrich-Film in Spielfilmlänge betrachten müssen. Dennoch wurde das Verfahren zum Ende der 90er Jahre unter dem Namen „Telcast“ auch im deutschen Fernsehen eingesetzt [113], allerdings auch hier nur für eine sehr begrenzte Zeit.

⁴⁹Wobei er darin „gewissermaßen“ die Bestätigung eines Ausspruchs des Gralsritters Gurnemanz (aus Wagners Parsifal) sieht: „Du siehst, mein Sohn, zu, Raum wird hier die Zeit“ (ebenda).

⁵⁰Translation oder Rotation.

4.6 Naked eye

Zur Stereoskopie ohne 3D-Brille

Zuerst stellt sich noch einmal die Frage, ob zur Wahrnehmung eines 3D-Effekts immer die Benutzung einer 3D-Brille erforderlich ist. Natürlich kann der Mensch in gewissen Grenzen auch aus zweidimensionalen Bildern räumliche Informationen gewinnen. Grundsätzlich muss man aber sagen, dass die Bedingung für das 3D-Sehen im Wesentlichen die Fusion zweier geeigneter Bilder ist. Brewster hatte in seiner Beschreibung des Stereoskops einen Weg aufgezeigt, zwei Einzelbilder auch ohne Brille zu fusionieren. Er wählte hierzu das Beispiel einer gemusterten Tapete, auf die der Betrachter starrt ([62], ab S. 97). Währenddessen gelingt es dem Betrachter irgendwie, die Sehachsen der Augen vor der Tapete zu kreuzen, also einen imaginären Punkt in der Luft zu fixieren. In Abb. 4.22 ist der Vorgang dargestellt. Der Betrachter sieht auf die Tapete (die etwas durchscheinend ist, um die Auftreffpunkte der Sichtachsen zu zeigen) und fixiert überkreuzt zwei Ornamente. Oben im Bild sind exemplarisch die zwei Ausschnitte gezeigt, die der Betrachter nun sieht.

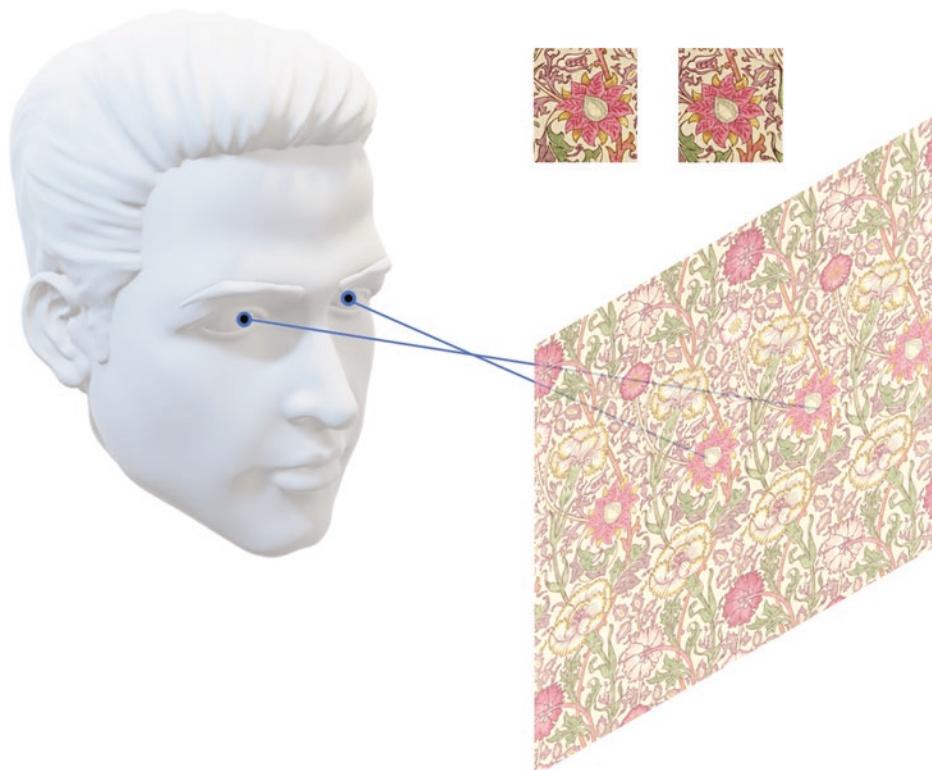


Abb. 4.22 Kreuzblick auf Brewsters Tapete, Grasnick (2019)

Im Ergebnis wird der Betrachter den Eindruck haben, dass das Muster der Tapete sich zwischen der Wand und ihm selbst befindet und sich zudem mit seiner Bewegung verändert.

In diesem Zusammenhang erzählt Brewster die Geschichte von Professor Christison, der von einer mit Sternen verzierten Wand geplagt war. Die Sterne tanzten vor der Wand und der gerade vom Fieber genesende Professor war in Sorge um seine Gesundheit. In der Tat muss man feststellen, dass sich kleine Objekte (in Christisons Fall Sterne) auf einer ansonsten nicht gemusterten Tapete vortrefflich für die Fusion mit Kreuzblick eignet.

Hintergrundinformation

Der Beobachter des Tapetenmusters erlebt etwas, was heute in der Stereoskopie mit dem Namen negative Parallaxe bezeichnet würde. Dabei sind die Bilder des linken und rechten Bildes so zueinander verschoben, dass der Betrachter vor dem Bildschirm konvergieren muss, um beide Bilder zu fusionieren. Würde man die Bilder des Stereobildpaars nebeneinanderlegen (so wie in Abb. 4.22 oben gezeigt), wären die Objekte zueinander verschoben.

Die Begriffe negative und positive Parallaxe (s. z. B. [114]), basieren auf der Annahme eines Bezugspunktes, von dem aus die Abweichung gemessen wird. Wenn man als horizontalen Bezugspunkt eines Bildes die erste Spalte annimmt, dann ergeben sich alle horizontalen Positionen der Objekte im Bild anhand der Spaltennummer als x-Werte. Schaut man sich z. B. die Kante der linken Blüte in Abb. 4.22 oben an, so stellt man fest, dass die Position der Blüte (von der linken Kante aus betrachtet) weiter rechts liegt, als die der rechten Blüte. Damit hat das Objekt eine höhere Spaltennummer. Die Parallaxe errechnet sich nun als Differenz der x-Koordinaten (oder der Spaltenzahl) von rechter und linker Position⁵¹ [115]. Hier ist der linke Wert größer als der rechte und, voilà, das Ergebnis ist negativ. Es ist also eine negative Parallaxe zu erwarten und ein vor dem Bildschirm tanzendes Objekt.

Das sich ein Stereobild auch mit Parallelblick betrachten lässt, bedarf keiner weiteren Erläuterung. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass sich bei Betrachtung des linken Bildes mit dem linken Auge und des rechten Bildes mit dem rechten Auge ein 3D-Eindruck einstellen muss. Es zeigt sich aber, dass es doch nicht ganz so einfach ist. Wheatstone hatte sich zu diesem Zweck ein Spiegelstereoskop gebaut, Brewster zwang die Sehachsen über prismatische Linsen auf den rechten Weg und Rollmann errichtete dafür eine vertikale Scheidewand [67]. Die Begründung dafür ist einfach. Durch den natürlichen Fusionszwang beim Sehen, der dafür verantwortlich ist, dass man im Alltag gewöhnlich keine Doppelbilder sieht, richten drehen sich die Augen automatisch auf den Fixationspunkt. Um die Augen parallel zu stellen, müsste der Beobachtungspunkt also immer in sehr weiter Entfernung liegen. Dem ist aber nicht so. Deshalb hatte Dove schon 1851 in seinem Vorschlag, das Doppelzehen als Stereoskop zu nutzen, davon gesprochen, dass man diesen Blick üben muss (aus [116], S. 187):

„Wer sich im Doppelzehen geübt hat, kann die beiden stereoskopischen Bilder nebeneinander legen, sie durch Doppelzehen ... in vier verwandeln, die beiden mittleren zum Decken bringen und erhält dann das Relief in der Mitte zwischen seinen beiden Projektionen.“

⁵¹Rechts minus links.

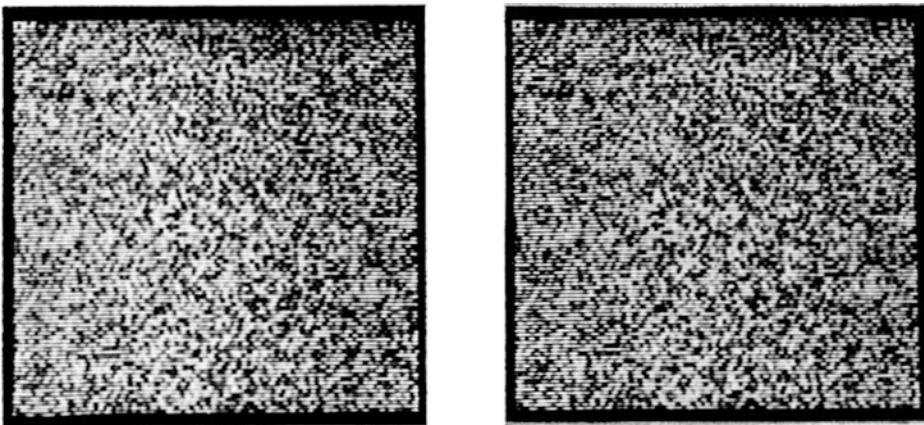


Abb. 4.23 Random-Dot-Stereogramm. (Béla Julesz (1960) aus [117], S. 1129, Fig. 4)

Dove hält den Parallelblick für anstrengend und rät sogar von dessen Gebrauch ab.

Die binokularen computergenerierter Muster, die der ungarische Wissenschaftler Julesz ab 1960 fabriziert [117], lassen sich sowohl mit Parallelblick, als auch mit Stereoskop betrachten. Das erstaunliche in Julesz' Random-Dot-Stereogrammen ist aber die Wirkung, die sie bei längerer Betrachtung entfalten (Abb. 4.23). Aus dem Wirrwarr der scheinbar zufälligen Punkte erhebt sich nach längerer Betrachtung ein Quadrat über den Hintergrund.

Die Funktionsweise von Julesz' Stereogrammen ist relativ einfach. Zunächst sind beide Muster völlig identisch. Dann werden in dem Bereich, der in einer anderen Ebene erscheinen soll, die jeweiligen schwarzen Punkte weiß gefärbt.

Für die Wirkung bedarf es aber immer noch eines Stereopaars. In Anlehnung an Julesz' stereoskopischen Prozess hatte der Neurowissenschaftler Christopher Tyler gemeinsam mit der Programmiererin Maureen Clarke eine Lösung gefunden, den 3D-Effekt auch mit einem Bild zu erzielen. Er kombinierte dabei im Prinzip die Idee der Brewsterschen Tapete mit dem Grundgedanken des Random-Dot-Stereogramms [118]. Durch einen kleinen Versatz oder durch umfärben einzelner Pixel im Muster, entsteht eine stereoskopische Disparität, die der Betrachter mit dem Kreuzblick als Raumbild wahrnehmen kann. Die Bezeichnung Autostereogramm, die Tyler und Clarke verwendeten, ist die bis heute gültige Bezeichnung⁵², obgleich es im wissenschaftlichen Umfeld auch gern als „Single Image Random Dot Stereogram“(SIRDS) bezeichnet wird.

Diese Technik, aus einem scheinbar zufälligen Muster ein Raumbild zu erzeugen, verfeinerte der Informatiker Baccei zu echter Kunst [119]. Der anstrengende Kreuzblick mutierte bei der Nutzung magischer Bilder zum etwas weniger belastenden Parallelblick⁵³,

⁵²Auch für „Das magische Auge“.

⁵³Weil man hierbei die „entspannte“ Unendlichkeitsstellung der Augen einnimmt.

schien aber diesmal nicht zu stören. Bacceis Buch „Das magische Auge“ verkaufte sich millionenfach.

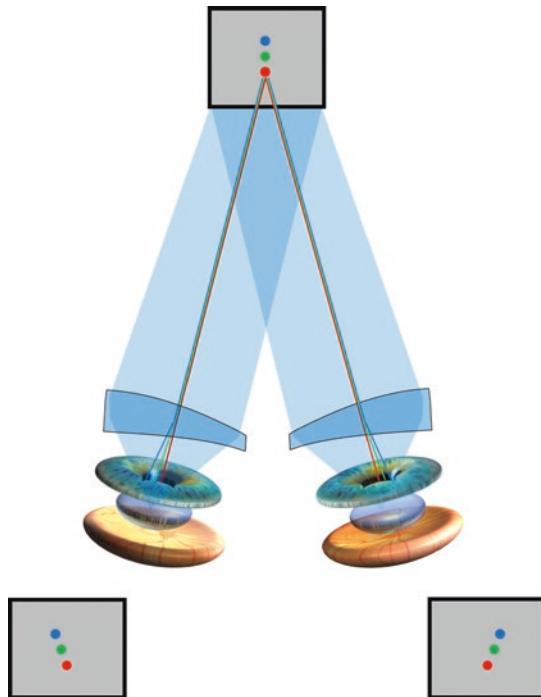
Es gibt noch eine weitere Möglichkeit, ein einzelnes Bild in ein 3D-Bild zu verwandeln. In diesen Fall werden nur die Farben des Bildes genutzt und auf jegliche Art der Stereobilddarstellung verzichtet. Seit Newton im 17. Jahrhundert das Licht durch ein Prisma mittels Dispersion in seine Farben zerlegte [120], ist die Möglichkeit bekannt, einer bestimmtem Farbe nach dem Durchgang durch das Prisma auch einen definierten Winkel zuzuordnen. Man kann sagen, dass sich bei bekannten Prismeneigenschaften die Farbe des Lichtes aus dem Dispersionwinkel oder umgekehrt, der Winkel anhand der Farbe bestimmen lässt. Diese Eigenschaften wurden von Brewster in seinem chromatischen Stereoskop ([121], ab S. 126) ausgenutzt. Der Effekt der Farbzersetzung kann durch prismatische Halblinsen oder echte Prismen erzielt werden. Der Unterschied ist hier, dass die Sehachsen nicht mehr wie im Linsen-Stereoskop abgeknickt werden, sondern auf einen gemeinsamen Punkt konvergieren können.

Die Wirkungsweise ist rasch erklärt. Beim Durchgang durch die Prismen des chromatischen Stereoskops wird der kurzwellige, blaue Anteil des Lichts stärker abgelenkt als die langwelligen, roten Anteile. Ein roter Punkt würde wenig abgelenkt, ein grüner etwas mehr und der blaue Punkt gar maximal. Da die Prismen um 180° zueinander verdreht sind, ist auch der Ablenkinkel genau entgegengesetzt. Dadurch entsteht im Augenpaar des Betrachters ein Stereobild, in dem die Position der Punkte nur von den Farben des Bildes abhängt. Die stereoskopische Farbtiefenwirkung ist in Abb. 4.24 illustriert. In der Abbildung oben sind die drei Farbpunkte dargestellt, die wie von Brewster vorgeschlagen durch die prismatische Halblinsen betrachtet werden. In Abhängigkeit von der Farbe wird der jeweilige Punkt mehr oder minder abgelenkt. Unten im Bild sind die beiden Netzhautbilder abgebildet, die nun eine Disparität aufweisen.

Auch hier muss das Stereoskop nicht auf dem Tisch stehen oder an der Wand hängen, sondern kann als Brille aufgesetzt werden. Da große Glasprismen schwer sind, gelang das erst sinnvoll mit Steenbliks Vorschlag, Mikroprismen oder diffraktive Elemente einzusetzen [122, 123]. Dadurch konnten preiswerte Brillen produziert werden, die unter der Bezeichnung „ChromaDepth“ [124] einige Bekanntheit erlangten.

Die Funktionsweise des chromatischen Stereoskops führt in Verbindung mit einem Bildschirm zu einem Problem. Im Prinzip könnte man mit den Farben des Regenbogens ein durchgängiges 3D-Gebilde mit vielen Abstufungen erschaffen. Unglücklicherweise liefert ein Bildschirm nur die drei RGB-Grundfarben. Alle anderen dargestellten Farben sind immer eine Mischung der Grundfarben. Wie gezeigt wurde, entspricht die Ablenkung und damit die wahrgenommene Tiefe immer einer bestimmten Wellenlänge. Das hat zur Folge, dass eine Mischfarbe auch eine Mischtiefe erzeugt. Man kann durch gezielte Anpassungen von Helligkeiten und Schattierungen zwar Verbesserungen erreichen [125], aber das Problem der eingeschränkten Farbpalette trotzdem nicht lösen. Zudem eignet sich das Verfahren kaum für eine stereoskopische Darstellung realer Aufnahmen, da eine Tiefe im Bild immer mit einer bestimmten Farbe dargestellt werden. Außerhalb der Präsentation wissenschaftlicher Erkenntnisse (z. B. [126]) oder im Bereich Werbung und Events ist der Einsatz durch die Farbbeschränkung doch einigermaßen limitiert.

Abb. 4.24 chromatisches
Stereoskop nach Brewster,
Grasnick (2019)



Man könnte sich die Frage stellen, ob denn keine 3D-Darstellung denkbar ist, die ohne solche Beschränkungen auskommt. Tatsächlich ist das nicht nur möglich, sondern sogar Realität. Der Tübinger Botaniker Gmelin hatte bei der Betrachtung von Objekten im Mikroskop festgestellt, dass die Tiefenwirkung invers wahrgenommen werden kann und konkave (nach innen gewölbte) Flächen mitunter konvex (nach außen gewölbt) wirken. Diese Tiefenumkehr, die Gmelin dem Schattenwurf zuschreibt, wird kann bei Masken besonders gut beobachtet werden. Eine hohle Maske, die gedreht wird, kann auch von hinten gesehen, wieder eine konvexe Wirkung haben (s. Abb. 4.25). Daher auch die Bezeichnung Hollow-Face-Illusion.

Wheatstone hatte den schon damals bekannten Cameo-Intaglio-Effekt beschrieben ([40], S. 383) und diesen der monokularen Beobachtung zugeschrieben. Ein Cameo (Kamee) ist ein erhabenes Relief auf einem Schmuckstein, das Intaglio (Gemme) dagegen ein eingeschnittenes Relief.

Brewster hatte festgestellt, dass die Betrachtung eines flachen Bildes mit beiden Augen zwangsläufig zur Aufdeckung der Flächenhaftigkeit der stereoskopischen Darstellung führt. Schließt man aber ein Auge, so scheint sich der räumliche Eindruck des Bildes zu verstärken („Monocular Relief“ s. [62], S. 46).

Der Fotograf Claudet, der sich schon mit dem Thaumatrop beschäftigt hatte, fertigte auch Stereobilder für Wheatstones und Brewsters Stereoskope an ([127], S. 124). Durch die Beschäftigung mit der Stereoskopie war er mit dem reliefartigen Bildeindruck

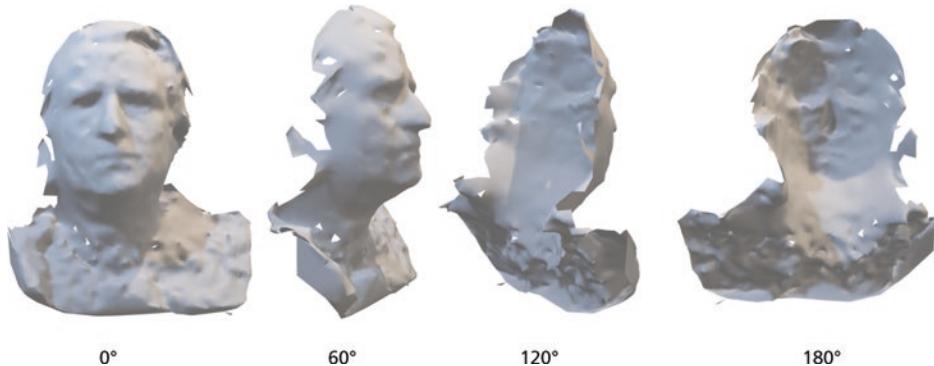


Abb. 4.25 Hollow-Face-Illusion, Grasnick (2019)

vertraut, den ein Raumbild erzeugt. Er konstruierte einen Apparat, bei dem ein Raumeindruck auch mit einer Abbildung erzeugt werden konnte [128]. Dabei wird das Stereobild mit zwei Objektiven auf eine Mattscheibe abgebildet und kann trotzdem stereoskopisch gesehen werden [129].

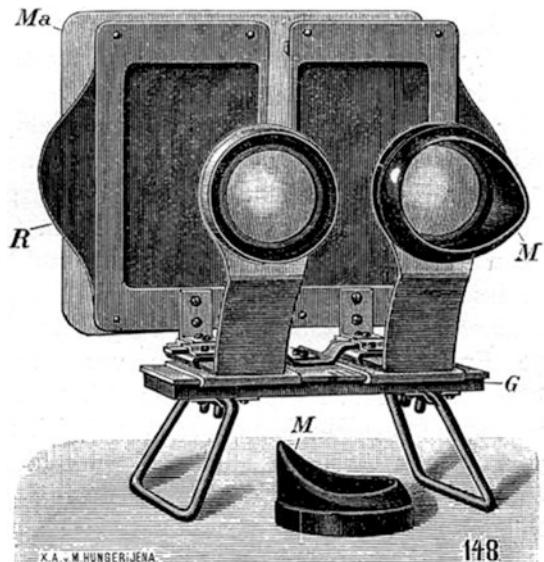
Den Jenaer Optiker von Rohr begeisterte das kaum und so verwies er lapidar auf die optische Abbildung, an der auch die Mattscheibe nichts ändert ([130], S. 103–104). Rohr war aber von dem Physiologen Gullstrand angeregt worden, einen binokularen Betrachter für das Brewstersche monokulare Relief zu konzipieren [131]. Daraufhin entwickelte Rohr den „Verant“, um jedem Auge das Einzelbild wieder unter dem gleichen Sehwinkel darzustellen, wie sie bei der Aufnahme gewesen waren. Zudem sollte die Gullstrandsche Bedingung eingehalten werden, die besagt, dass der Augendrehpunkt mit den Kreuzungspunkten der Hauptstrahlen zusammenfallen muss ([132], S. 33). So kann das Auge beliebig über das Bild schweifen, ohne dass sich die Perspektive ändert. Es ist sicherlich hilfreich, einen solchen Veranten auch einmal vorzustellen, da das Gerät heute nicht mehr benutzt wird. Daher nun ein Bild aus der damaligen Gebrauchsanweisung (Abb. 4.26).

Rohr war ein nicht nur ein Kenner der binokularen Instrumente, sondern darüber hinaus auch ein eifriger Erfinder. Die Kenntnis der „naturwahren“ Darstellung verhalf ihm zu der Idee des Synopters, mit dem beide Augen das gleiche Bild sehen konnten [134]. Von Rohr meinte, dass beim Betrachten einer Fotografie mit dem Synopter ebenfalls ein Raumeindruck entstehen kann, der beim beidäugigen Sehen ohne Synopter wieder zunichte gemacht würde.

Das monokulare Tiefensehen wurde von dem Physiologen Ames später noch einmal untersucht [135]. Ames meinte nun u. a., dass man einen stärkeren Raumeindruck gewinne, wenn sich die Fixationspunkt von der Bildebene entfernen könnte⁵⁴. Dazu schlug er auch die Verwendung von Linsen vor. Ames hatte einige umfangreichere

⁵⁴Ames Hypothese wurde 2016 an der School of Psychology & Neuroscience der Universität von St. Andrews überprüft und bestätigt [136].

Abb. 4.26 Zeiss
Doppelverant. (Carl Zeiss Jena
(1902) aus [133])



Experimente durchgeführt, um die monokulare und binokulare Wahrnehmung zu testen. Den nach ihm benannten Ames-Raum hatte er so ausgelegt, das bei einäugiger Beobachtung durch ein Guckloch die Illusion von einer bestimmten Position der Raum nicht nur räumlich, sondern in seinen Abmessungen perfekt wirkte [137]. Die Illusion wird dann aufgedeckt, wenn Personen den Raum betreten. In der Fotografie (Abb. 4.27) ist der gleiche Ames-Raum zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten fotografiert. Die Größenverhältnisse wirken nicht ganz normal, betrachtet man sich aber beide Bilder, erkennt man leicht den Trick. Der Raum ist in Wirklichkeit verzerrt, erzeugt aber über das Muster des Fußbodens und die Kanten der Wände die monokulare Illusion einer korrekten Architektur. Ames hatte mit diesem Aufbau ein Beispiel gegeben, dass auch das Sehen



Abb. 4.27 Die Wessons im Ames-Raum, Grasnick (2019)

mit einem Auge zu einem Raumeindruck führen kann. Hier allerdings zu einer falschen Impression.

Ames Idee, die Wirkung eines flachen Bildes mittels Glaslinsen zu verstärken, basiert auf der grundsätzlichen Überzeugung, eine realistische Impression ließe sich mit den Mitteln der Mathematik und Optik bewerkstelligen. Der Mathematiker John Dee verfasste ein Vorwort zur englischen Übersetzung von Euklids Elementen [138], in dem er unter anderem die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Mathematik beschreibt. Neben solchen offensichtlichen Anwendungen in Geometrie, Architektur, Navigation oder Perspektive finden sich auch überaus ungewöhnliche Verwendungen wie Astrologie, Anthrographie⁵⁵, Thaumaturgie⁵⁶ oder Zographie⁵⁷. Die Zographie im Dee'schen Sinne beschreibt die Kunst, eine virtuelle visuelle Wahrnehmung zu erschaffen, die von äußerstem Realismus ist. Eine technische Umsetzung dieser Idee beschrieb der Mathematiker Kohlhans in seiner Beschreibung optischer Kuriositäten 1677. Im Kapitel „Von finstern Kästlein“ (womit natürlich eine Camera obscura gemeint ist) berichtet er von der Wirkung einer dem Guckloch vorgesetztem Linse (s. [60], S. 295):

„Thut man aber in das Sehe-Loch ein ander *vitrum convexum*⁵⁸..., so siehet man die *objecta* ...wie sie von aussen *libero oculo* ⁵⁹vorkommen, in der Weite, Breite, Rundung und Distanz.“

Damit ist gemeint, dass bei Betrachtung der Objekte im Inneren des finsternen Kästleins durch die Linse eine Wirkung erzielt wird, die dem natürlichen Sehen entspricht. Diese Art der Darstellung wurde in den folgenden Jahren beliebt und führte zur Verwendung eines einfachen optischen Gerätes zur Betrachtung von Bildern, dem Zograskop⁶⁰. Ein Zograskop ist nichts weiter als eine große Linse, durch die man ein Bild betrachtet. Für die praktische Anwendung ist die Linse des Zograskops in einem Rahmen gefasst und auf einem Stativ montiert (s. Abb. 4.28). Hinter der Linse ist häufig (auch in diesem Fall) ein Spiegel montiert, der um 45 Grad gegenüber der Tischplatte gekippt ist (im Bild schon etwas an die Linse geklappt). So kann man zur Betrachtung die Bilder einfach auf den Tisch legen.

Es erscheint unglaublich, aber der Bildeindruck bei der zograskopischen Betrachtung irgendeines Bildes entsteht der Raumeindruck unwillkürlich, ohne Anstrengungen und sofort. Das Grundprinzip ist die Vergrößerung durch die Linse. Das zu betrachtende Bild befindet sich wie bei einer Lupe in der Nähe des Brennpunktes. Dadurch kann

⁵⁵Beschreibung der äußeren Menschlichen Erscheinung.

⁵⁶Wundertätigkeit.

⁵⁷Von (griech.) *Zoe* = Leben und -grafie = Zeichnen.

⁵⁸Konvexes Glas.

⁵⁹Mit freiem Auge.

⁶⁰Aus griech. *Zoe* = Leben + -grafie = Zeichnen + -skop = betrachten zusammengesetzt, quasi ein „Lebensbildbetrachter“.

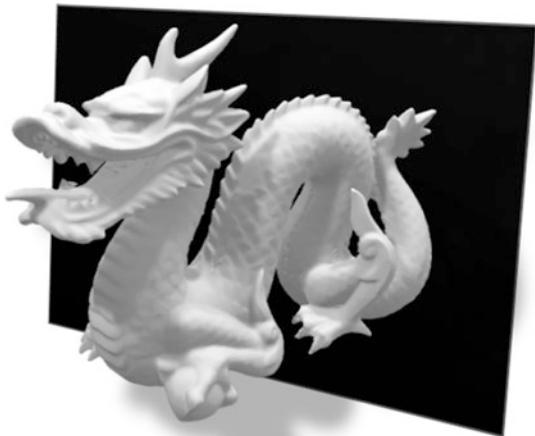
Abb. 4.28 Zograskop (spätes 18. Jhd.). (Susan B. Price (2006) Wikimedia Commons, bearbeitet)



das Auge entspannt auf große Entferungen akkommodieren, die Augen konvergieren nicht. Im Resultat wird die normalerweise existierende binokulare Disparität, also die Unterschiedlichkeit der Bilder beider Augen, eliminiert. Der Blick des Betrachters wird zyklopisch⁶¹. Da zusätzlich bei großen Betrachtungsentfernen (wie durch die Linse suggeriert wird) keine Bewegungsparallaxe zu erwarten ist, sind jetzt alle

⁶¹Einäugig, nach der griech. Mythologie sind die Zyklopen die einäugigen Söhne von Gaia und Uranos, bei Homer diejenigen, mit denen Odysseus einige Scherereien hatte [139].

Abb. 4.29 virtuelles
Passepartout, Grasnick (2019)



physiologischen Indikatoren, die auf die Flachheit des Bildes hindeuten könnten, ausgeschaltet. Zudem sind die Kanten des Bildes durch die Vergrößerung der Linse nicht mehr im Gesichtsfeld des Betrachters. Die Wahrnehmung der Bildtiefe basiert nun allein auf physiologischen Effekten, die sich aus der Gestaltung des Bildes und der Erfahrung ableiten lassen (s. a. „Natürliches Raumsehen“). Der Effekt wird von den meisten Beobachtern bestätigt (s. z. B. [140]). Wenn der Effekt nun maßgeblich auf den monokularen Tiefenfaktoren basiert, lässt sich die Raumwirkung maximieren, wenn man tatsächlich alle Faktoren einbezieht. Das nutzt man seit Jahrhunderten in der Technik des Trompe-l’œil⁶², bei der versucht wird mittels fotorealistischer Darstellung und besonders durch die korrekte Verwendung von Licht, Schatten und Perspektive den Eindruck eines realen Objektes zu erwecken. Mit einem simplen Trick lässt sich nochmals eine Steigerung erzielen. Durch die Verwendung von realen oder virtuellen Passepartouts (s. z. B. [141]) wird die Raumanordnung deutlich und der Tiefeneffekt verstärkt (s. z. B. Abb. 4.29).

Da die Funktion des Raumsehens immer dann besonders gut funktioniert, wenn beide Augen exakt das Gleiche sehen, wird das 3D-Sehen auch dann angeregt, wenn die Szene auch einäugig ohne irgendein Hilfsmittel betrachtet wird, zum Beispiel durch vollständiges verdecken oder Schließen eines Auges. Der einäugig wahrnehmbare Pulfrich-Effekt bei Bewegung wurde 1982 an einer Patientin beobachtet und als Abnormalität beschrieben [142]. Tatsächlich ist das 3D-Sehen mit einem Auge aber völlig normal und tritt auch bei völlig gesunden Menschen auf. Durch die Bewegung wird eine zeitliche Parallaxe in das Bild eingeführt, die eine verstärkte Raumwirkung hervorruft.

⁶²Frz. Tromper = täuschen + l’ œil = das Auge.

Der monokulare Pulfrich-Effekt – Ein 3D-Display für Jedermann

Pulfrich selbst erwähnte, dass er infolge einer in der Jugend erlittenen Verletzung auf dem linken Auge blind gewesen sei und den „Pulfrich“-Stereo-Effekt mit eigenen Augen niemals gesehen hätte (aus [110], S. 555). Dennoch könnte auch Pulfrich mit dem verbliebenen Auge noch Stereo gesehen haben.

Und das geht so.

Man sucht sich zunächst ein Video in guter Qualität, in dem viel Bewegung oder Drehung stattfindet. Gut eignen sich dafür Videos mit schnellen Kamerafahrten und von Überflügen⁶³. Der Inhalt ist dabei kaum von Bedeutung. Wichtig ist lediglich, dass viel Bewegung existiert und die Objekte der Szene unterschiedlich im Raum angeordnet sind.

Wenn man nun mit beiden Augen auf diese Szene schaut, erhält man schon allein durch die Bewegung ein gewisses Verständnis für den Szenenaufbau. Hält man sich jetzt noch ein Auge zu, erscheint die Szene den meisten Betrachtern nach kurzer Zeit tatsächlich in 3D. Diese Wirkung ist so realistisch, wie sie mit anderen Verfahren kaum zu erzielen sein wird.

Welches Auge dabei zugehalten wird ist nicht entscheidend, ebenso wenig wie die Richtung der Bewegung. Entgegen dem klassischen Pulfrich-Effekt mit Brille ist der einäugige Pulfrich-Effekt äußerst tolerant. Es ist gleichgültig, in welche Richtung sich die Szene bewegt. Wichtig ist nur die Bewegung selbst.

4.7 Autostereoskopie

Von Barrieren und Linsen

Die stereoskopische Betrachtung ist davon ausgegangen, dass zur Erzeugung einer räumlichen Wirkung maximal zwei Bilder notwendig sind. Prinzipiell reicht das auch aus, wenn die Bilder auf geeignete Art und Weise dargeboten werden. Geeignet ist die Darbietung immer dann, wenn ein Auge nur das Bild sieht, das für dieses Auge vorgesehen ist. Damit also das linke Auge nur das linke Bild sieht, können zur Erzwingung dieser Zuordnung die unterschiedlichsten Stereoskope, 3D-Brillen oder Sehtechniken eingesetzt werden.

Was passiert aber, wenn diese Zuordnung nicht möglich ist? Wenn also beispielsweise eine 3D-Darstellung großformatig und im öffentlichen Raum erfolgen soll, bei dem die Zuschauer zufällig und unvorbereitet vor 3D-Anzeige auftauchen? In diesem Fall und in allen anderen Fällen, bei denen die Besucher nicht mit einer Brille ausgestattet

⁶³Bei einer Internetsuche finden sich schnell einige Beispiele, wenn man „3D“ und die Phrase „one eye closed“ in einer Videosuche eingibt.



Abb. 4.30 The Magic Disc. (F. J. Vernay, Yorick (1898) aus [146])

werden können, versucht man den 3D-Effekt über eine autostereoskopische⁶⁴ Anzeige zu erzeugen. Dabei wird der Bildinhalt über eine Optik so im Raum dargestellt, dass ein Betrachter sich vor der Anzeige positionieren kann und dabei keine Hilfsmittel wie 3D-Brille oder Stereoskop benötigt⁶⁵.

Die einfachste Art einer solchen Optik basiert auf einer transparenten Folie, auf der ein nicht transparentes (opakes) Streifengitter angebracht ist. Der Londoner Verlagsmitarbeiter Symons schlug 1896 ein solches Raster vor, das über einem Bild angebracht werden sollte⁶⁶. Die einzelnen Elemente des Bildes waren aus verschiedenen Linien aufgebaut⁶⁷, wodurch bei Überlagerung mit dem „Raster-Zaun“ der transparenten Folie immer ein bestimmtes Muster entstehen musste⁶⁸. Auf Basis dieser Idee gab der Londoner Verlag Bliss, Sands & Co. 1898 das „Motograph Moving Picture Book“⁶⁹ heraus, in dem einige geeignete Bilder dargestellt und die Folie mitgeliefert wurde.

In Abb. 4.30 ist die Überlagerung von Bild und Raster dargestellt. Auf der linken Seite sieht man das gedruckte Bild ohne Raster, auf der rechten Seite das gleiche Bild

⁶⁴S. hierzu z. B. das „Handbuch der Autostereoskopie“ [143].

⁶⁵Wheatstones oder Maxwells Stereoskope kamen zwar auch ohne Hilfsmittel aus, die Betrachtungsfreiheit vor dem Stereoskop war jedoch äußerst gering.

⁶⁶„Verbesserte bewegliche Geräte zur Erzeugung von veränderlichen optischen Täuschungen“ [144, 145].

⁶⁷Teils horizontal, teils vertikal, häufig gewellt.

⁶⁸Was heute als Moiré-Effekt bekannt ist.

⁶⁹Das Titelbild stammt von dem berühmten französischen Maler Toulouse-Lautrec.

mit dem Raster überlagert. Man sieht nun deutlich die dunklen Moiré-Streifen, deren Lage, Richtung und Größe sich ändert, wenn man das Raster vor dem Bild verschiebt oder dreht. Dadurch entsteht der Eindruck von Bewegung.

Mit einem solchen Raster kann aber nicht nur die Illusion von Bewegung erzeugt werden. Durch geeignete Vorbereitung eines Stereobildpaars kann aus Raster und Bild ein Raumeindruck ohne Stereoskop entstehen. Eine Idee dazu hatte 1896 der französische Fotograf Berthier, der in seiner Veröffentlichung „*Images stéréoscopiques de grand format*“ [147] neben einem Abriss zur Stereoskopie auch den Vorschlag von Überlagerung von Bild und Raster präsentierte. Wie bei einem Wechselbild setzt Berthier das Rasterbild aus den Bildstreifen zweier Perspektivansichten zusammen. Die Separation erfolgt aber jetzt über das vorgesetzte Streifenraster. Der Prozess ist anhand der von Berthier verwendeten Bilder dargestellt. Im oberen Bild der Abb. 4.31 ist das Streifenraster über das zusammengesetzte Bild gelegt. Im Gegensatz zu einem „Motograph“ wird hier ein Abstand zwischen Bild und Raster benötigt. Links unten ist das zusammengesetzte Bild dargestellt und rechts daneben die beiden Bilder, die ein Betrachter mit dem linken und rechten Auge sehen würde.

Der 3D-Effekt wird hier nur schwer zu beobachten sein, da durch die breiten schwarzen Linien der Bildeindruck insgesamt gestört wird.

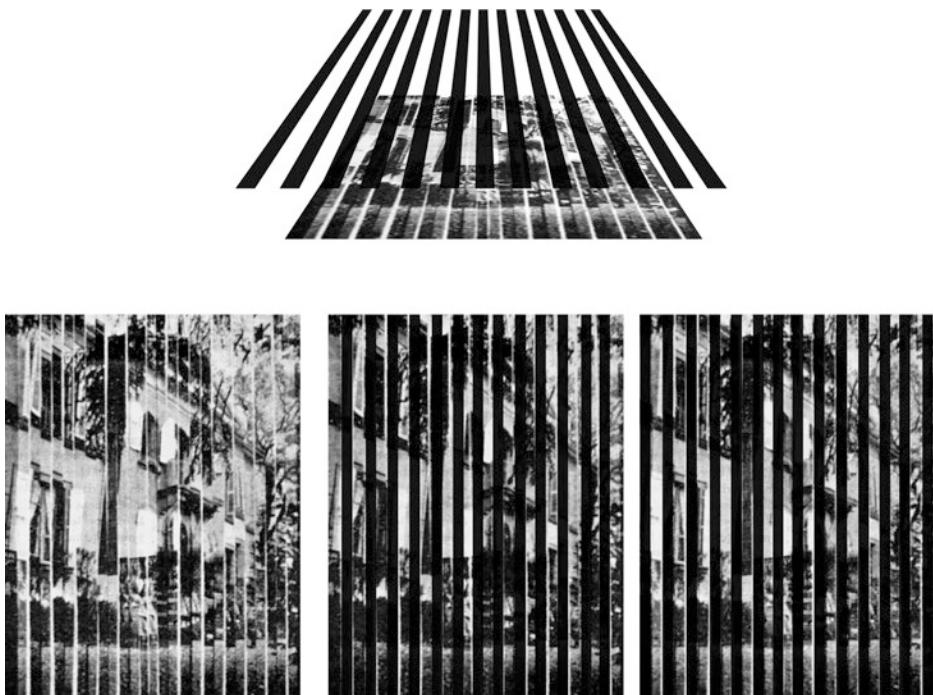


Abb. 4.31 Stéréoscopies lignées. (Auguste Berthier (1896) aus [147], S. 330, bearbeitet (Grasnick 2019))

Das machte der Amerikaner Ives unverkennbar besser. Frederic Ives entwickelte die Kromolinoskop-Kamera für sein Kromskop⁷⁰ [148]. Dabei erfand Ives eine Vereinfachung zur Aufnahme stereoskopischer Bilder mit einem einzelnen Objektiv. Das funktionierte recht einfach, wenn zwischen Filmbühne und Objektiv ein Streifenraster montiert wurde. In der ersten Präsentation der Idee [149] wird die Verwendung des Streifenraster auch zur autostereoskopischen Wiedergabe beschrieben⁷¹. Zum Schluss gibt Ives seiner Erfindung den Namen „Parallax-Stereogram“⁷². Kurz darauf beschreibt er in einer Patentveröffentlichung [150] insbesondere die Aufnahme des stereoskopischen Bildes. Dabei ist der fotografische Film direkt unter dem Streifenraster angeordnet. Die Betrachtung eines Parallax-Stereogramms erfolgt über einen Betrachtungsbildschirm⁷³, der dem Streifenraster aus alternierenden opaken und transparenten Linien entspricht. Das erlaubte schon damals eine hilfsmittelfreie Betrachtung des Stereogramms aus einer definierten Betrachtungsposition⁷⁴.

Ives beschreibt hier die Basis eines autostereoskopischen Monitors, ohne diese Bezeichnung zu verwenden. Das Adjektiv „autostereoskopisch“ (autostéréoscopique, aus [151]) wird erst wenige Jahre später von Estanave eingeführt. Estanave, der mit den Konzepten von Berthier und Ives vertraut war (wie man seinem Patent entnehmen kann, s. [152], S. 1), erweiterte deren Ideen auch zu einer stereoskopischen Doppelrasterprojektion [153]. Dabei wird das stereoskopische Bildpaar durch ein erstes Raster auf eine Streuscheibe („glace dépolie“, Milchglas) projiziert. Dadurch werden die Einzelbilder in Streifen zerlegt und gleichzeitig miteinander verkämmt. Ein Betrachter sieht durch ein zweites Raster auf das verkämmte Streifenbild und erhält einen echten stereoskopischen Eindruck. Estanave verwendete die Barrieren nicht nur zur autostereoskopischen Darstellung, sondern auch zur Präsentation klassischer Wechselbilder [151]. Sowohl von Ives als auch von Estanave sind einige autostereoskopische Arbeiten erhalten geblieben [154]. Darunter finden sich⁷⁵ auch Wechselbilder [155], die selbst nach heutigen Maßstäben von hoher Qualität sind. In den Bildern aus der Anfangszeit des 20. Jahrhunderts war die Barrierestruktur bereits so fein, dass sie mit bloßem Auge kaum wahrnehmbar war. Problematisch an einer Barriere ist immer der Lichtverlust, der zwangsläufig durch die verdeckenden Linien entsteht. Man kann diesen Nachteil aber mittels einer Abbildung durch Linsen umgehen

Eine kleine Notiz des französischen Physikers Lippmann zeigte die Möglichkeit der brillenfreien Betrachtung durch viele Einzellinsen. Lippmann hatte 1908 mit der

⁷⁰Auch Kromoskop oder Chromoscope, ein Stereoskop zur Darstellung vollfarbiger Fotografien.

⁷¹„...a stereogram which should require no stereoscope...“ (aus [149], S. 51).

⁷²„...I propose to call them parallax stereograms.“ (aus [149], S. 52).

⁷³„transparent line-viewing-screen“ (aus [150], S. 1).

⁷⁴„...a stereogram ... seen from a suitable view-point without the aid of any optical device...“ (aus [150], S. 1).

⁷⁵Z. B. in den Sammlungen der „Société Française de Photographie“.

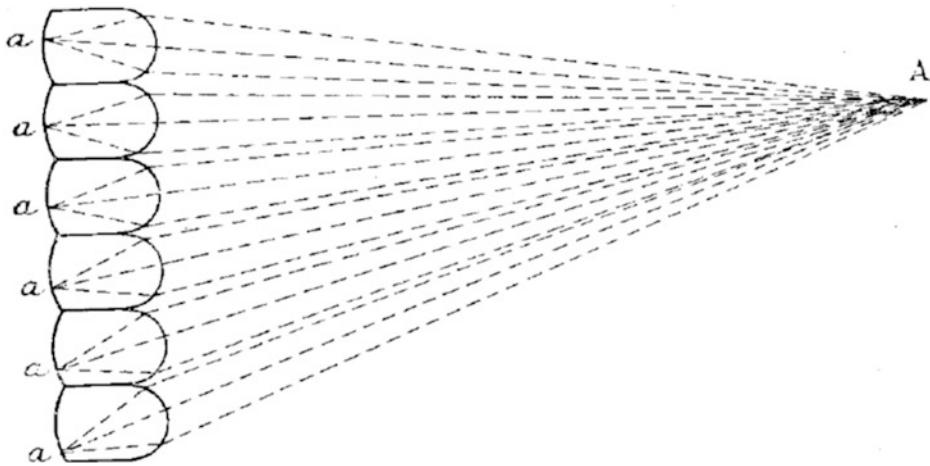


Abb. 4.32 Linsenraster für Integrafotografie. (Gabriel Lippmann (1908) aus [156], S. 823, Fig. 1)

Integrafotografie [156] ein Verfahren skizziert, bei dem sich der 3D-Effekt ohne eine Brille ganz einfach durch die Betrachtung des Bildes einstellt. Lippmann, der im gleichen Jahr den Nobelpreis für seine Farbfotografie⁷⁶ erhalten sollte, hatte dafür seine hochempfindliche Fotoschicht mit einer optischen Oberfläche ausgestattet. Lippmanns Zeichnung (Abb. 4.32) zeigt die Funktion seiner Idee. Der Objektpunkt A wird durch die konvexe Vorderseite der kleinen Stablinsen auf die ebenfalls konvexe Rückseite der Linsen fokussiert. Auf dieser Seite war auch die fotoempfindliche Schicht aufgebracht. Jeder Bildpunkt *a* ist unter der Stablinsen an einer etwas anderen Position abgebildet. Nach Entwicklung des Films konnte dieser durch das gleiche Linsenraster wieder in 3D betrachtet werden.

Es ist durch einen Zeitzeugen⁷⁷ überliefert, dass Lippmann anstelle der Stablinsen kleine Kugeln verwendete [157]. Obwohl die Kugeln nur einen Durchmesser von etwa 0,25 mm⁷⁸ hatten, wurde unter jeder Kugel ein vollständiges Bild aufgezeichnet. Das lag vor allem an der hohen Auflösung des Films. Ein heutiger fotografischer Film kann eine Auflösung von mehr als 100 Linien pro mm aufweisen⁷⁹. Ein holografischer Film bringt es schon auf einige tausend Linien⁸⁰. Lippmanns Fotoemulsion war sogar noch feiner.

⁷⁶Heliochromie, aus griech. helios = Sonne + chroma = Farbe.

⁷⁷Vermutlich Jaques Boyer, in der Quelle nur „the French Correspondent of the Scientific American“ genannt.

⁷⁸„weniger als ein Hundertstel eines Zolls“.

⁷⁹Z. B. Fujichrome „Velvia 50“ mit ca. 16 Linien pro mm [158].

⁸⁰Z. B. Thorlabs PHG63 „Green Holography Plate“ mit ca. 3000 Linien pro mm [159].

Der Lippmannsche Farbfilm hatte eine Auflösung von etwa 10.000 Linien pro Millimeter⁸¹ [160]. Bei einer Kugelgröße von nur 0,25 mm können so trotzdem 2500 Linien unter jeder Glaskugel abgebildet werden, was in etwa einem Bild mit Full-HD-Auflösung entspräche. Setzt man dazu noch die Größe einer Lippmann-Foto-Platte⁸² ins Verhältnis, so lässt sich schnell ermitteln, dass unglaubliche 86.400⁸³ Bilder auf eine Heliochromie passen.

Betrachtet man diese Bilder wieder durch das gleiche Linsenraster, erscheint sich dem Betrachter beim Blick auf die Platte ein 3D-Raum zu eröffnen. Allerdings erscheint der Effekt in der Tiefe invertiert, vorne wird hinten und hinten vorne. Wie bei einer Hollow-Face-Illusion (s. a. Abb. 4.25) kann man vielleicht trotzdem einen 3D-Eindruck gewinnen, der aber in sich zusammenstürzen muss, wenn man sich vor dem Bild bewegt. Eine Lösung wäre das Umdrehen des Bildes, um es von hinten zu betrachten. Dann wäre es zwar seitenverkehrt, aber zumindest tiefenrichtig. Dabei könnte die Linsenstruktur als positionsabhängige Beleuchtung fungieren, wenn das Bild genügend transparent wäre. Obwohl die übliche Funktionsweise eines heliochromen Farbbildes auf der Reflexion des einfallenden Lichts an den Siberpartikeln der Fotoschicht beruht, scheint hier die Durchlichtfähigkeit der Lippmannschen Platten gegeben gewesen zu sein. Um das 3D-Bild zu sehen, wurde die Aufnahme mit einem „guten Licht“ von hinten beleuchtet [157] und dabei vielleicht einfach nur umgedreht. In einer frühen Analyse von Lippmanns Technik hatte der Russe Sokolov⁸⁴ genau dieses Vorgehen vorgeschlagen [162]. Auch Ives⁸⁵ hatte einige Jahre später dieses Problem erkannt [163] und dafür eine technische Lösung präsentiert, bei der die einzelnen Sub-Bilder durch eine weitere optische Abbildung nun wieder seitenrichtig erscheinen [164]. Von Lippmann selbst ist keine intensive Beschäftigung mit der Pseudoskopie bekannt geworden. Man könnte jedoch vermuten, dass Lippmanns Hinweis zur doppelten Gleichrichtung⁸⁶ (fotografisch und geometrisch) in diese Richtung zielt.

Das Grundproblem der umgekehrten Tiefe durch die Vertauschung der Stereobilder war schon Wheatstone bekannt, der zur absichtlichen Erzeugung des falschen Eindrucks ein Gerät entwickelte, das er Pseudoskop nannte ([57], S. 11). Beim Blick durch das Pseudoskop kann dieser Effekt künstlich erzeugt werden. Wheatstone hatte das Gerät in einem Aufsatz skizziert, das hier nur ein wenig um den Strahlengang ergänzt wurde (s. Abb. 4.33). Beim Blick auf ein Objekt (durch die roten Linien dargestellt) wird das Bild für jedes Auge an der inneren Fläche des Prismas (blau) gespiegelt. Unter den Augen

⁸¹Die hohe Auflösung in Lippmanns Film war notwendig, da Lippmanns Heliochromie auf der Interferenz des Lichtes beruhte (deshalb auch mitunter interferentielle Fotografie genannt).

⁸²Die üblicherweise eine Größe von 6 × 9 cm hatte (s. z. B. [161], S. 66).

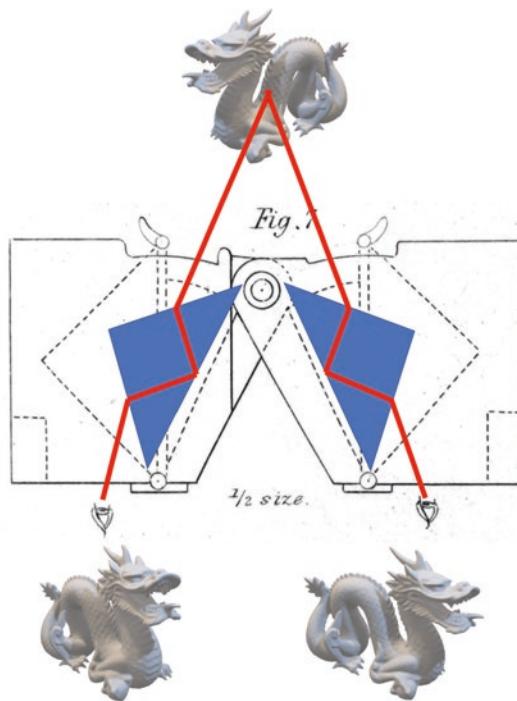
⁸³240 × 360.

⁸⁴Von dem heute nicht viel mehr bekannt ist als sein Name und die Tatsache, dass er Professor an der staatlichen Universität Moskau war.

⁸⁵Herbert E. Ives.

⁸⁶„un double redressement, photographique et géométrique.“ [156], S. 823.

Abb. 4.33 Wheatstones
Pseudoskop, Charles
Wheatstone (1852), Grasnick
(2019)



sind die jeweiligen Bilder dargestellt. Die Tiefe des Objektes ist insgesamt invertiert. Bei der Interpretation des gesehenen Bildes versucht der Verstand, die optische Wirkung zu korrigieren. Insbesondere bei komplizierten Objekten oder ganzen Landschaften wird die Umkehrwirkung nicht vollständig sein. Gut gelingt es, wenn man einfache Objekte mit strukturierter Oberfläche frei im Raum aufstellt und diese mit dem Pseudoskop betrachtet. Ein konvexer Zylinder kann dann wie eine konkav Regenrinne aussehen.

Ungeachtet des dem Verfahren innewohnenden „pseudoskopischen Defekts“⁸⁷ lieferte Lippmanns Integralfotografie durch die unterliegende Heliochromie noch weitere Herausforderungen. Die Notwendigkeit der extremen Auflösung ging mit einer geringeren Empfindlichkeit der Emulsion und der daraus resultierenden Verlängerung der Belichtungszeit einher. Zudem wurde während der Aufnahme mit Quecksilber gearbeitet, welches bekanntermaßen giftig ist und seine toxischen Dämpfe bereits bei Zimmertemperatur abgibt. Die Farbwiedergabe einer Heliochromie ist winkel-abhängig und benötigt eine gute Beleuchtung. Da sich diese Farbfotografien auch nicht vervielfältigen ließen, hat sich Lippmanns Farbfotografie trotz Nobelpreis nicht durchgesetzt. Die Integralfotografie hat sich dagegen erhalten. Die Aufnahmetechnik mit mehreren Kameras, die schon Lippmann nutzte, war die Basis für verschiedene

⁸⁷So nannte es zumindest Herbert E. Ives (s. a. [163, 164]).

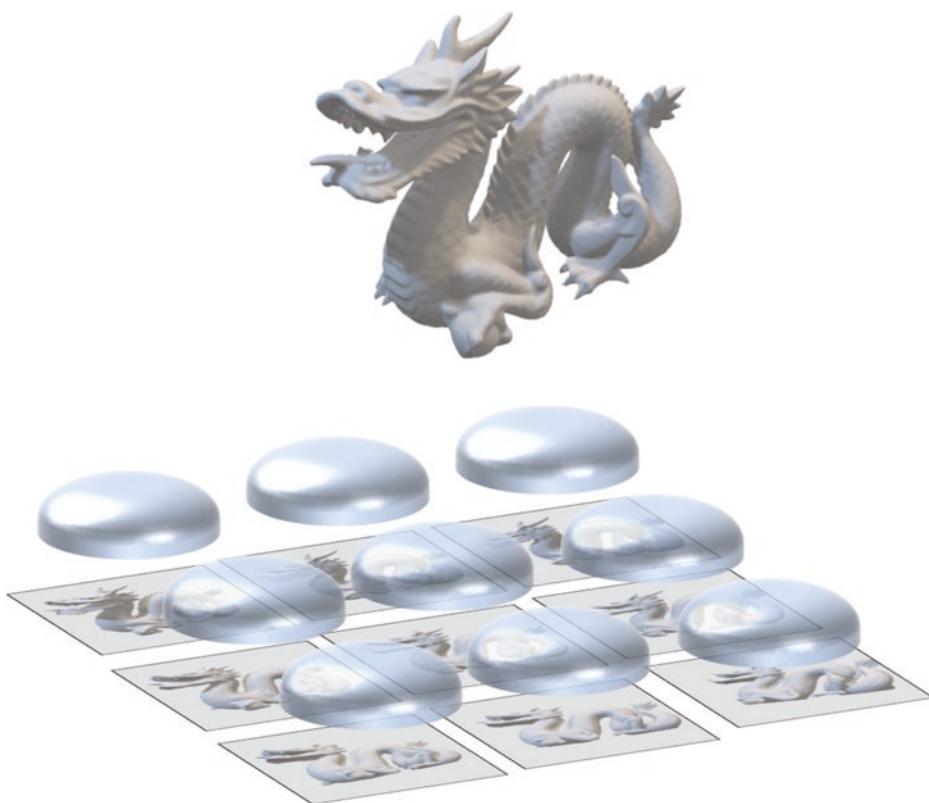


Abb. 4.34 Integralfotografie Aufnahme, Grasnick (2019)

Lichtfeldkameras⁸⁸. Das Konzept ist recht einfach. Ein Objekt wird aus mehreren Positionen auf irgendeiner lichtempfindlichen Schicht oder einem Sensor aufgezeichnet (s. Abb. 4.34). Unter jeder Linse entsteht das Bild des Objekts aus einer etwas anderen Perspektive.

Das entspricht in etwa der Aufnahme eines mit mehreren Kameras aus unterschiedlichen Positionen (illustriert in Abb. 4.35). Hier wird auch deutlich, warum ein Linsenraster geeigneter (und preiswerter) ist, als eine Anordnung vieler Kameras. Ein Linsenraster lässt sich einfacher vor jedem Bild montieren und die Linsen können so klein sein, dass das Auge sie nicht mehr auflösen kann.

Die Integralfotografie lieferte im Vergleich zu den autostereoskopischen Verfahren von Herbert Ives oder Eugène Estanave ganz sicher einen freierem 3D-Eindruck, da die

⁸⁸Bekannt besonders die von Ren Ng entwickelte [165] Lytro (mittlerweile eingestellt).



Abb. 4.35 Integralfotografie mit mehreren Kameras, Grasnick (2019)

Bewegungsfreiheit vor einer Barriere geometrisch durch die Begrenzung auf zwei Perspektiven eingeschränkt wird. Weil das linke Auge nur das linke Bild sehen darf und selbstverständlich das rechte Auge nur das rechte Bild, ist die horizontale Bewegungsfreiheit auf den Augenabstand (nur etwas mehr als 6 cm) limitiert. Vor einer Integralfotografie kann der Betrachter sich bequem und uneingeschränkt bewegen solange er sich im Öffnungswinkel der Einzellinsen aufhält.

Anhand des bekannten Aufbaus eines Lippmannschen Rasters (s. z. B. [143], Abschn. 4.4.3.1) kann der Bewegungsfreiheit vor einer Integralfotografie abgeschätzt

werden. Der Öffnungswinkel der Globuli beträgt etwa 45 Grad, sodass ein Betrachter, der das Bild aus 50 cm Entfernung betrachtet, sich mehr als 40 cm frei vor dem Bild bewegen kann. Aufgrund dieses vielversprechenden Initialvorteils der Integralfotografie gegenüber anderen Verfahren wurden immer wieder Versuche angestellt, auf Basis des Lippmannschen Grundgedankens kommerziell erfolgreiche Lösungen zu erzielen. An einer technischen Lösung hatten sich zwar einige Wissenschaftler, Ingenieure oder Erfinder beteiligt⁸⁹, auf diesem speziellen Ansatz aber nicht den entscheidenden Durchbruch geschafft. Auch der britische 3D-Filmpionier⁹⁰ und Erfinder Dudley konnte trotz zahlreicher Patente zur Stereoskopie⁹¹ auf diesem Gebiet nicht den entscheidenden Durchbruch bewirken. Die Integralfotografie war weniger erfolgreich, als es ihr anfängliches Potenzial vermuten ließ. Dem Anschein nach standen neben dem pseudoskopischen Defekt auch die Schwierigkeiten bei der Herstellung des Linsenrasters mit einer Unzahl von Einzellinsen in hoher Qualität und die notwendige außerordentliche Auflösung des Wiedergabematerials einer Verbreitung im Wege.

Würde man zur Aufnahme bei der Integralfotografie normale Kameras anstelle des Linsenrasters verwenden, benötigte man dafür eine erhebliche Anzahl an Kameras. Das ist dadurch bedingt, dass durch die Verwendung von Einzellinsen eine Veränderung der Perspektive in Abhängigkeit von der seitlichen Lage und der Höhe der jeweiligen Linse bewirkt wird. Die Augen sind natürlich nebeneinander angeordnet, wodurch die Veränderung der vertikalen Perspektive beim Raumsehen eher untergeordnet ist. Der Schweizer Hess fand hierzu eine Lösung, die ebenso wie in Ives Parallax-Stereogramm auf einem Streifenraster unter Fortfall der vertikalen Perspektiven basiert. Entgegen der Iveschen Barrierelösung setzte Hess auf Zylinderlinsen, die durchaus schon in der damaligen Farbfotografie genutzt wurden und somit auch hergestellt werden konnten. Die Basis dafür war John Jolys Linienrasterfotografie. Joly wandelte die grundsätzliche Idee der Farbfotografie von Ducos du Haurons [173] ein wenig ab. Du Hauron legte noch die farbigen und transparenten Farbabzüge übereinander, sodass daraus ein vollfarbiges Bild entstand. Joly machte es anders. Er projizierte die einzelnen Farbkanäle in feinen Streifen auf eine Rasterplatte [174] und verwendete dazu Levy-Raster⁹² [176]. Die Löcher des Levy-Rasters wirken wie eine Vielzahl einzelner Camera obscura und damit im Prinzip wie die Linsen einer Integralfotografie. Es ist klar, dass bei der Nutzung einer

⁸⁹Z. B. Kanolt 1930 „Production of Stereoscopic Pictures“, Herbert Ives 1935 „Optical Device“ [164], Winnek Coffey 1935 „Apparatus for making a composite stereograph“ [166], Valius 1949 „Rasteroptik“ [167], de Montebello 1966 „Integral Photography“(Integral) [168] oder Dudnikov 1970 „Autostereoscopy and Integral Photography“ [169, 170].

⁹⁰Der schon 1935 ein autostereoskopisches Kino entwarf (s. [171], S. 173).

⁹¹Er selbst behauptete 1956 sogar, er hielte mehr Patente in der Stereoskopie, als irgendeine andere lebende Person (aus [172], S. 56).

⁹²Erfunden von Max Levy, einem amerikanischen Fotopionier deutscher Abstammung, nach Frederic Ives Kreuzraster auf Basis von Georg Meisenbachs Lineaturfotografie (s. S. [175], S. 913–919).

Lochkamera anstelle eines Linsenrasters die Lichtstärke am Film deutlich reduziert wird. Neben der dadurch verursachten Verlängerung der Belichtungszeit entstehen durch die schlechteren Abbildungseigenschaften einer einfachen Lochblende zudem Unschärfen. Dies kann durch die Verwendung vieler mikroskopisch kleiner Einzellinsen verbessert werden, erhöht aber wieder die Schwierigkeiten bei der Fertigung. Berthon adressierte genau diese Probleme und schlug in logischer Konsequenz die Verwendung von Zylinderlinsen vor (aus [177], S. 2):

„Man kann sich mit einer kleineren Anzahl von Linsen begnügen, wenn man Zylinderlinsen anwendet, indem man z.B. auf einer ebenen Platte parallel nebeneinander halbzylindrische Fäden aus durchsichtigem, lichtbrechendem Material anordnet.“

Die von ihm vorgeschlagene Form der Fertigung⁹³ wurde vom Industriellen Keller-Dorian⁹⁴ umgesetzt und später von Siemens⁹⁵ für den deutschen Farbfilm verwendet. Da Hess sowohl mit Ives' Parallax-Stereogrammen als auch mit Lippmanns Integralfotografie vertraut war, konnte er beide Elemente mit einem Zylinderlinsenraster kombinieren [180]. Hess patentierte seine Idee weltweit und gründete sogar eine eigene Firma, war aber kommerziell mit dieser Idee selbst nicht erfolgreich [181], allerdings erhielt er später den Nobelpreis für seine Forschungen auf dem Gebiet der Physiologie. Einige Jahrzehnte später, mit der Verfügbarkeit solcher Linsenraster nutzten auch die Wissenschaftler Kanolt (als „ribbed lenses“ ([182], S. 4)) und „lenticular“ ([183], S. 4, 5) und Ives (als „lenticular“ ([184], S. 1, 2, 4, [185])) in Unkenntnis von Hess früherer Entwicklung eine ähnliche Technologie zur autostereoskopischen Bildwiedergabe. Beide benutzen den Ausdruck „lenticular“ (linsenformig), der in seiner deutschen Form als „Lentikular“ fast immer auf ein Linsenraster mit vertikalen Zylinderlinsen hinweist. Die Verfügbarkeit preiswerter Linsenraster⁹⁶ zur 3D-Darstellung schien die Entwicklung der Autostereoskopie zu befördern. Die Erfinder der 10er, 20er und 30er Jahre des 19. Jahrhunderts beschäftigten sich häufig gleichzeitig mit Linsenraster und Barriere. Kanolt und Ives hatten gewiss bemerkt, dass eine Parallax-Barriere oder ein Zylinderlinsenraster, mit einem einzigen stereoskopischen Bildpaar kombiniert, nur einen begrenzten Betrachtungsraum ermöglicht. Soll ein Betrachter sich wie einer Integralfotografie frei bewegen können, müssen mehr Bilder verwendet werden. Das erkannte auch Kanolt und bot mit seiner „Photographischen Methode“ [187] einen Lösungsansatz an. Ein Betrachter, der vor Kanolts Fotografie steht, kann ein dreidimensionales

⁹³ „Die Zylinderlinsen können auf Film[s] mit geriffelten Walzen hergestellt werden...“ ([177], S. 2).

⁹⁴ Unter dem Namen Keller-Dorian-Berthon-Prozess [178].

⁹⁵ Als Opticolor oder Berthon-Siemens [179].

⁹⁶ Z. B. als Walzenprägung des Filmmaterials direkt im Filmgießprozess für die Herstellung beliebig langer Filmbahnen mit Linsenrastern (s. IG Farben [186]).



Abb. 4.36 Ivanov (im grauen Anzug) vor dem Rasterschirm. (Preslit (1941) aus [195], S. 213)

Bild wahrnehmen⁹⁷. Zusätzlich ändert sich bei Bewegung auch der Bildeindruck⁹⁸. Kanolt bewegte dazu das Kameraobjektiv, die Barriere oder Linsen⁹⁹ oder auch den Aufnahmefilm während der Aufnahme horizontal. Wenn nach der Entwicklung und bei der Betrachtung das so aufgenommene Bild wieder mit einem gleichen Barriere- oder Linsenraster überlagert wird, sieht der Betrachter aus unterschiedlichen Positionen einen etwas unterschiedlichen Raumeindruck. Diese Bewegungsparallaxe kommt dem natürlichen Raumsehen schon sehr nahe. In den 30er Jahren ist es Ives¹⁰⁰, der diesen Effekt für seine „Parallax Panoramagramme“ verwendet [189]. Ives benötigt dazu keine Bewegung der Kamerakomponenten, sondern bildet die Szene durch eine Objektivlinse

⁹⁷ „When the picture is viewed through a screen ... a stereoscopic image is obtained ...“ ([187], S. 1).

⁹⁸ „... representation of continuous motions ...“ ([187], S. 1).

⁹⁹ „...preferably a line screen, although it may be made up of parallel cylindrical lenses“ ([187], S. 2).

¹⁰⁰ Diesmal Herbert Eugene Ives, Sohn von Frederic Eugene Ives [188].

direkt durch das Raster auf den Film ab¹⁰¹. Genau wie Kanolt reduziert sich Ives in seinen Ideen nicht auf die Parallax-Barriere, sondern schlägt ganz natürlich auch Linsenraster vor [185]. Er geht aber noch über Kanolts Idee hinaus. Im gleichen Patent erwähnt er die Verwendung seiner Technologie für die Nutzung im Bewegtbildfilm¹⁰² vor. Der Belgier Noaillon entwickelte zur gleichen Zeit einige Patente im Bereich der Stereoskopie, von denen sein Barriere-Kino-System [190] besonders erwähnenswert ist. Noaillon weicht in dieser Veröffentlichung von den bisherigen parallelen Barrierestreifen ab und entwickelt ein radiales Raster¹⁰³, um dem gesamten Auditorium ein gleichermaßen gutes 3D-Vergnügen zu verschaffen.

Der Russe Ivanov¹⁰⁴ baute auf dieser Idee tatsächlich ein ganzes Kino, für das er ein perspektivisches Gitter („perspective grille“, aus [195]) aus 150 km Kupferdraht in einem Moskauer Kino aufspannte (s. Abb. 4.36). In diesem Kino wurde sogar ein eigens produzierter Film¹⁰⁵ aufgeführt.

Die Technik hat trotz der gewaltigen Größe der Darstellung und sogar mit den Verbesserungen, die Gabor beigesteuert hatte [197] über diese einmaligen Aufbauten keine Verbreitung gefunden. Eine Begründung dafür ist offensichtlich der begrenzten Betrachtungsraum der Darstellung, wie Ivanov selbst einräumt¹⁰⁶.

Barriere oder Linse?

Von Beginn der Autostereoskopie an war es möglich, den räumlichen Effekt gleichermaßen mit Barrieren oder Linsen zu erzielen. Berthiers grobe Idee der Parallax-Barriere wurde von F. Ives und Estanave zur funktionstüchtigen, freiäugigen Raumwiedergabe weiterentwickelt. Lippmanns Integralfotografie, die von Sokolov wieder durch ein Lochraster nachgebildet wurde, konnte von Hess und Berthon auf eine rein horizontale Parallaxe mit Zylinderlinsen vereinfacht werden. Kanolt und H. E. Ives erweiterten den Betrachtungsraum durch die gleichzeitige Wiedergabe mehrerer Perspektivansichten. Auch in diesen Varianten war es möglich, den Effekt mit Linsen oder Barrieren zu erzielen.

¹⁰¹Im Prinzip auch eine Lichtfeldkamera mit Reduktion auf horizontale Parallaxe (s. z. Vgl. Ng's Lichtfeldkamera von 2005 [165]).

¹⁰²„motion picture film“ ([185], S. 3).

¹⁰³Diese Technik wurde im Journal der Society of Motion Picture Engineers von 1952 auch als „Noaillon Theorie“ bezeichnet [191]. In der gleichen Ausgabe veröffentlichte übrigens auch Kaplan seinen bemerkenswerten Aufsatz über die Theorie der Parallax-Barriere [192].

¹⁰⁴Gelegentlich wird von zwei Ivanovs berichtet (z. B. in [193], S. 5): Neben Semyon Pavlovich Ivanov und war auch B. (Boris?) T. Ivanov (und sogar Valius) am Bau des Moskauer Rasterschirms beteiligt. Da er sich B. T. Ivanov im Vorwort seines Buches zur Autostereoskopie ([194], S. 4) auf S. P. Ivanov bezieht, muss es sich tatsächlich um einen anderen Ivanov handeln.

¹⁰⁵„Semlja Molodosti“ (Land der Jugend); Regie Alexander Andrijewski, teilweise farbige Szenen; der Film wird mitunter noch vorgeführt, z. B. 2013 im Filmmuseum München [196].

¹⁰⁶„One drawback of this first stereo-cinema is that each spectator has to find his own viewpoint and stick to it; a movement to right or left, a bend of the head, and the image is lost for the moment.“ (aus [195], S. 213).

Die heute übliche Bezeichnung „Barriere“ ist eine Verkürzung des sperrigen Begriffes „Parallax-Barriere“, der spätestens seit den 50er Jahren des 19. Jahrhunderts mit Kaplans Aufsatz „Theory of Parallax Barriers“ [192] in die Fachliteratur Eingang fand. Der Begriff „Barriere“ ist dabei durchaus beschreibend: Mithilfe die Barriere wird der Blick auf einige Bildteile blockiert. Der Begriff Parallaxe beschreibt ganz allgemein die scheinbare Ortsveränderung eines Objektes bei Änderung der Eigenposition und definiert somit auch die wahrgenommene Lagedifferenz dieses Objektes beim binokularen Sehen. Vater und Sohn Ives nutzten den Begriff „Parallaxe“ zur Beschreibung ihrer Technologie (z. B. „Parallax-Stereogramm“ oder „Parallax-Panoramagramm“). Eine Parallax-Barriere ist also nichts weiter als ein Raster aus feinen undurchsichtigen Linien, die auf einem durchsichtigen Material aufgebracht werden. Wie Joly oder Sokolov, kann man auch ein Lochraster auf einer Fläche erzeugen. Da jedes einzelne Loch bei der Wiedergabe wie eine Laterna magica wirkt, erhält man so mit einfachen Mitteln eine Vielzahl von verteilten Laternen über eine große Fläche. Die prinzipiell gleiche Funktionsweise ist bei der Wiedergabe durch Lippmanns Linsenraster bei der Integralfotografie zu beobachten. Das Hess-Kanolt-Ives-sche (vertikale) Zylinderlinsenraster ist nichts weiter als eine Reduktion der Linsenabbildung auf eine Dimension. Da das Licht durch die eindimensional gekrümmte Linsenoberfläche nur noch horizontal gebrochen wird, erhält man anstelle eines Brennpunktes eine „Brennlinie“. Nutzt man eine Zylinderlinse als Kameraobjektiv, wird die Aufnahme eine horizontal zusammengeschobene Darstellung zeigen. Eine zweite Zylinderlinse vor der Aufnahme entzerrt das Bild und vergrößert es wieder horizontal. Bei einem Raster aus Zylinderlinsen hat man also wieder eine Vielzahl von Camera obscura, aber diesmal nur horizontal verteilt. Eine Barriere wird, wenn die Öffnungen ausreichend klein sind, ebenso wie eine Lochkamera, jedoch mit zylindrischer Abbildung funktionieren, genaugenommen also wie eine „Spaltkamera“. Sind die Spalten sehr breit, erfolgt keine optische Abbildung, sondern die Barriere funktioniert rein auf positionsabhängiger Verdeckung und Aufdeckung von Bildteilen. Die Bildteile sind dann aneinandergesetzte Streifen der verschiedenen Perspektivbilder (s. Berthier Abb. 4.31).

Wie man sehen kann, sind Barriere und Linsen hinsichtlich der Abbildung recht gut vergleichbar und durchaus funktionstüchtig. Barrieren lassen sich einfach auf fotografischem Wege belichten oder großformatig drucken. Die Herstellung von Linsenrastern ist technologisch anspruchsvoller, da man ein entsprechendes Prägewerkzeug benötigt. Dafür haben Linsenraster den entscheidenden Vorteil, dass diese mehr Licht passieren lassen. Ein Barriereraster ist eben auch eine Barriere für das Licht. Will man beispielsweise ein Panoramagramm aus 10 Einzelperspektiven wiedergeben, kann bei der Wiedergabe nur noch 1/10 des Lichtes die Barriere passieren.

Die Entscheidung, ob man ein Linsen- oder ein Barriereraster verwenden soll, hängt also von der Bildzahl, der benutzbaren Beleuchtung des Bildes (also der Helligkeit der Projektion bzw. des Monitors) und der Verfügbarkeit der Fertigungstechnologie ab. So werden aufgrund der einfachen Fertigbarkeit Barrieren gern in Lehre und Forschung verwendet, Linsenraster aber häufiger im professionellen Bereich.

Nachdem die grundlegende Technik zur Aufnahme und Wiedergabe von 3D-Bildern, die ohne jegliche Hilfsmittel betrachtet werden können, entwickelt war, ließ die Weiterentwicklung nicht lange auf sich warten. Schon mit der Laterna magica konnte man kurze Bildsequenzen wiedergeben. Die Entwicklung der Fernsehtechnik gab dem Thema neuen Auftrieb. Winnek Coffey beschrieb 1931 einen „Television Apparatus“ (s. [198], S. 7), der auf Basis von Linsenrastern räumliche Bilder projizieren konnte. Mit dem tatsächlichen Auftauchen von Kathodenstrahlröhren als Bildgeber im Fernsehen gab es

sogleich auch Vorschläge, Bildröhren und Linsengleichzeitig zur Raumbilderzeugung zu nutzen. Ein frühes Zeugnis davon ist Eislers Idee des stereoskopischen Fernsehens, bei der die Idee der Hess'schen Vertikallinsen und dem Kanoltschen Parallax-Stereogramm mit Bildröhren kombiniert wurden. Eisler hatte 1936 in seinem Patent US 2,209,747 auch die zeitgleiche Aufnahme und Wiedergabe von Bildern aus mehreren Positionen vorgeschlagen. Diese Technik würde man heute als Multiview bezeichnen. Ein solches System hatte auch Winnek Coffey im Sinn, als er ein „zusammengesetztes Stereogramm mit mehreren Aspekten“¹⁰⁷ entwarf und dabei beiläufig ein Grundproblem der Autostereoskopie adressierte. Legt man nämlich zwei Raster übereinander, ergeben sich immer und zwangsläufig Überlagerungerscheinungen, die als unerwünschte Muster erscheinen und als Interferenz- oder Moirémuster bezeichnet werden.

Moiré-Effekt

Einfache Moirémuster wurden bereits beim „Motograph“ zur Erzeugung der Illusion von Bewegung genutzt. Hier waren die Effekte allerdings gewünscht, um den Eindruck von Bildbewegung zu erzielen.

Ursprünglich wurde der Begriff Moiré¹⁰⁸ für einen Stoff verwendet, der eine charakteristisches Muster aufwies. Namensgebend ist der fließende Glanz und das wellenförmige Muster¹⁰⁹ des Stoffes. Seit dem 17. Jahrhundert wurde die Herstellung dieses Stoffes in Frankreich durch Colbert, einem Minister des „Sonnenkönigs“, festgelegt, der sich mit einem wahrhaften Regulierungseifer¹¹⁰ bemühte, den Wohlstand Frankreichs im Sinne Ludwig XIV. zu mehren. Unter Colberts Einfluss wurden die Zollschränken zwischen den französischen Provinzen abgebaut und die Herstellung von Seiden gegenüber dem Ausland protektioniert (s. [201], S. 6). Der Moiré ist dabei das Resultat einer Technik, zwei Stofflagen aus geripptem Stoff aufeinander zu legen und gegeneinander zu verpressen. Die Stoffe, bevorzugt Seide, aber auch Taft oder Rips, habe eine starke Oberflächenstruktur, die durch das verwendete Garn und die Webtechnik definiert wird. Als Beispiel ist ein Taft-Stoff dargestellt, der eine recht regelmäßige, gitterhafte Oberfläche aufweist (s. Abb. 4.37).

Legt man nun zwei dieser Stoffe aufeinander, so wird die Ausrichtung der beiden Stoffe zueinander niemals perfekt sein. Der Stoff ist in die eine oder andere Richtung gestreckt oder gestaucht, was eine etwas unregelmäßige Gitterstruktur verursacht. Zur Illustration wurden auf Basis der Abb. 4.37 zwei etwas unterschiedliche Lagen erstellt (Abb. 4.38 und 4.39).

Legt man beide Lagen übereinander, ergibt sich ein Moirémuster (s. Abb. 4.40).

Dieser Moiré basiert auf dem Vorhandensein zweier Lagen. Ein Moiré-Stoff muss aber keineswegs zweilagig sein. Deshalb presst man beide Lagen mit starkem Druck, je nach Stoff unter Zuhilfenahme von Wasser oder Hitze, übereinander. An den Stellen, an denen beide Lagen

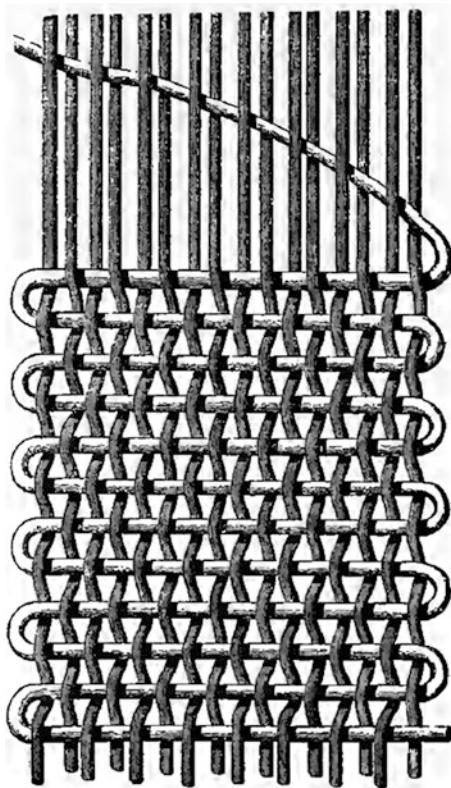
¹⁰⁷ „....composite stereograph of the multiple aspect type...“ (aus [199], S. 1), dabei meint Winnek mit „Aspekt“ tatsächlich einen bestimmtem Blickwinkel.

¹⁰⁸Nach dem Duden der oder das Moiré.

¹⁰⁹Nach dem frz. moirer = wässern, maromieren und dem engl. mohair = Mohairwolle od. -stoff (nach dessen Glanz).

¹¹⁰Ein Bild dazu geben die Briefe, Instruktionen und Erinnerungen Colberts [200].

Abb. 4.37 Schéma du taffetas. (Henri Algoud (1912) aus [201], S. 41)



aufeinanderliegen¹¹¹, werden die Fäden in beiden Lagen plattgedrückt und glänzen stärker, als die ursprünglich runden Fäden. Dieser Effekt ist auch ein gewünschtes Resultat beim Mängeln von Wäsche (s. [202], S. 235).

Der „echte“ Moiré-Effekt fällt bei jedem Stoff unterschiedlich aus und ist in seiner tatsächlichen Ausprägung kaum vorherzusagen. Einfacher in der Herstellung ist der „unechte“ Moiré. Dieser wird einfach mit einer strukturierten Walze auf das Textil geprägt.

Die Wirkung beim textilen Moiré fällt durch die ungenauen Abstände der Fäden immer etwas zufällig aus. Beim einem Linsenraster vor einem Display sieht das schon anders aus. Das Raster der Pixel eines Bildschirms ist in Spalten und Zeilen angeordnet, ein Linsen und Bariereraster ebenso. Legt man ganz einfach zwei Bariereraster übereinander, ergibt sich der Moiré-Effekt von selbst. In Abb. 4.41 sind zwei Linienraster dargestellt, die übereinandergelegt sind. Da die Rasterweite¹¹² ein wenig voneinander abweicht, ergibt sich schon dadurch ein Moiré.

¹¹¹Das sind die Stellen, bei denen der Kettfaden (im Webstuhl die Längsfäden, quasi das „Grundraster“ des Gewebes) über dem Schussfaden liegt (der quer zum Grindraster in die Kettfäden eingewebt wird).

¹¹²Der Abstand der transparenten Linien.

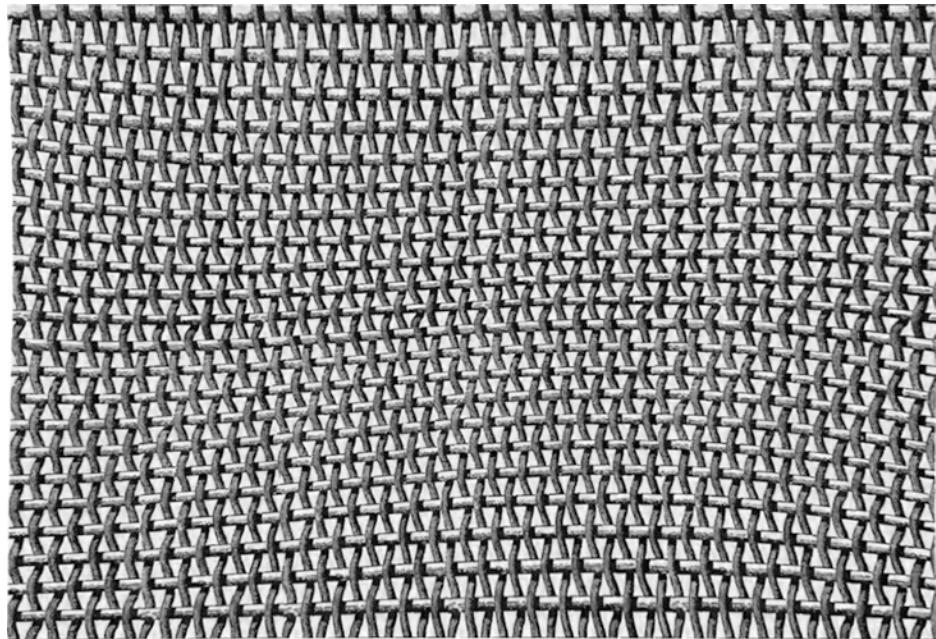


Abb. 4.38 Taft, untere Moirélage, Grasnick (2019)

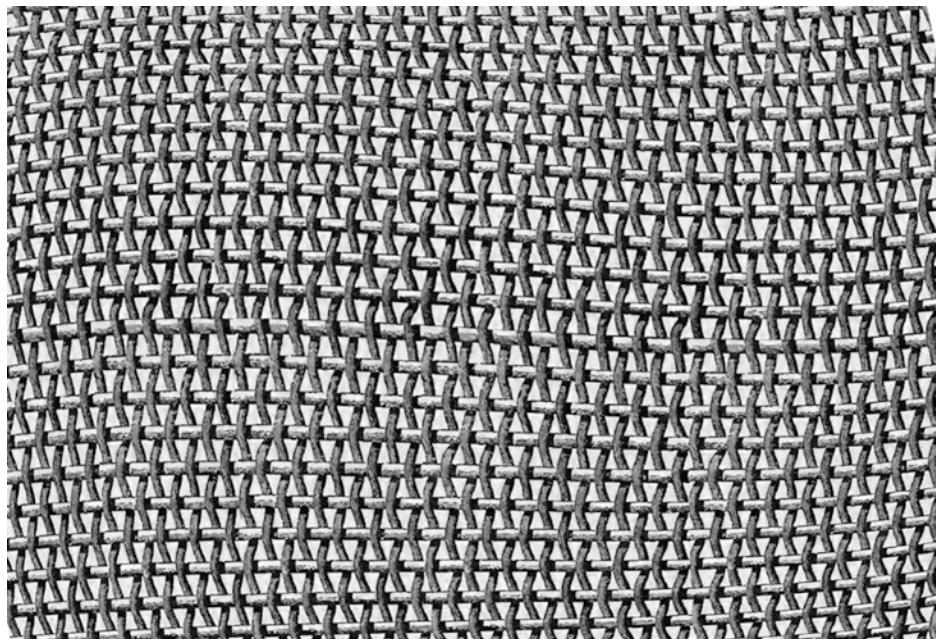


Abb. 4.39 Taft, obere Moirélage, Grasnick (2019)

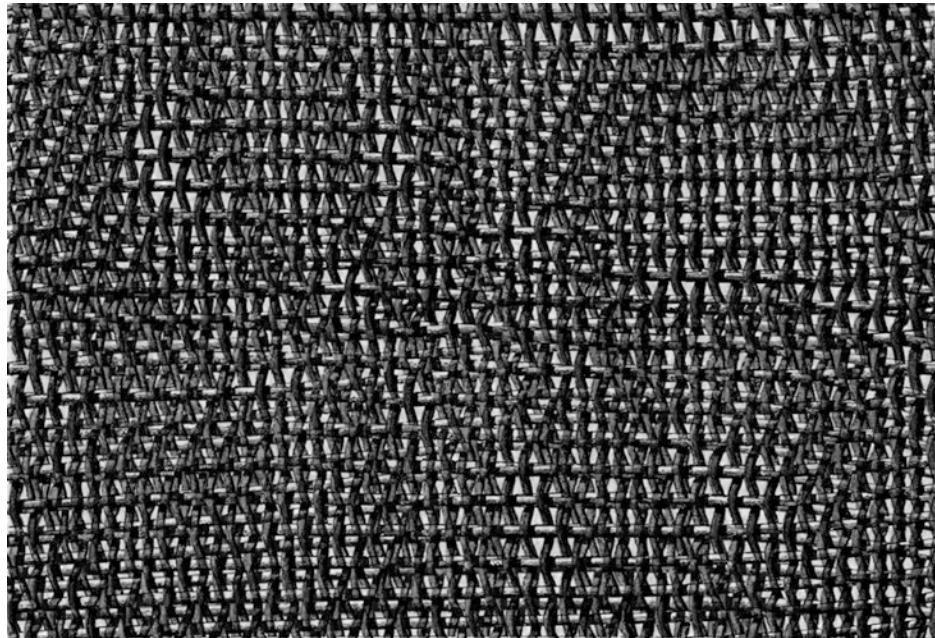


Abb. 4.40 Taft, zweilagiger Moiré, Grasnick (2019)

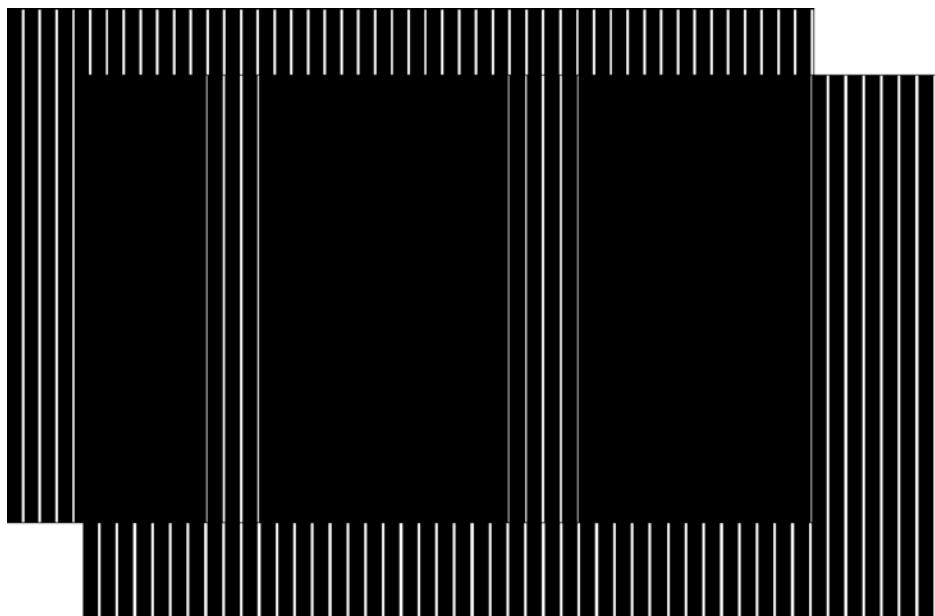


Abb. 4.41 Moiré zweier paralleler Linienraster, Grasnick (2019)

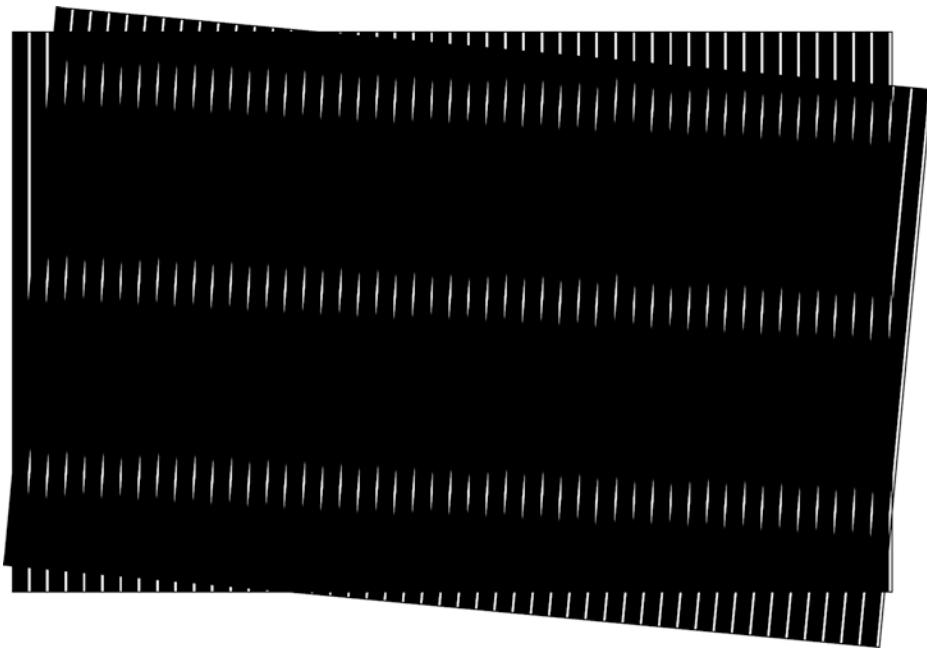


Abb. 4.42 Moiré zweier verdrehter Linienraster, Grasnick (2019)

Ebenso ergibt sich ein Moiré, wenn beide Raster zueinander verdreht sind (Abb. 4.42).

Diese Moiré-Effekte sind in der Regel in Druck- oder Bildschirmanwendungen unerwünscht. Da sich diese Effekte mathematisch beschreiben lassen, kann die unerwünschte Wirkung im Design minimiert werden. Ein guter Einstieg hierzu ist Amidror mit seiner „Theory of the Moiré Phenomenon“ [203].

Winnek hatte für sein Multi-Aspekt-System zur Reduzierung der unerwünschten Moiré-Streifen eine Schrägstellung der Linsen vorgeschlagen [199]. Ein Lösungsansatz, der später von den 3D-Bildschirmherstellern Stereographics [204] und Philips [205] übernommen wurde. Ebenso, wie die Schrägstellung der Linsenraster die Moirés am 3D-Displays verringert, lässt sich der positive Effekt einer schrägen Struktur auch bei Barrieren beobachten. Dadurch begründet, setzte die Firma techXpert aus Jena bei ihren auto-stereoskopischen Displays auf schräggestellte Barrieren [206], ebenso wie das singapurische Unternehmen Sunny Ocean Studios¹¹³.

Die bisher vorgestellten Systeme hatte allesamt den Nachteil, dass sie ausschließlich für die Nutzung als stereoskopische Anzeige tauglich waren. Eine Barriere oder ein Linsenraster reduzieren aber immer auch die Auflösung des Grundgerätes. Will

¹¹³Wobei Sunny Ocean nicht nur Parallaxbarrieren sondern auch schräge Zonenplatte verwendete [206] und dadurch Bildschirme mit bis zu 64 Perspektivansichten herstellen konnte [207].

man beispielsweise einen 3D-Monitor auch für hochauflösende 2D-Ausgabe nutzen, wird sich die Struktur der Linsen oder Streifen negativ auf die Auflösung auswirken. Es liegt auf der Hand, dass bei schneller Bewegung des Rasters über den Bildschirm, für den Betrachter nach kürzester Zeit irgendwann einmal alle Pixel sichtbar wären. Das japanische Unternehmen Sanyo¹¹⁴ entwickelte zum Ende der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts einige bemerkenswerte 3D-Monitore und dafür auch die skurrile Idee des mechanischen Barriere-Transports. Die bestechend einfach Idee der mechanischen Verschiebung [208] birgt aber die Forderung nach schneller Bewegung des Rasters. Durch die Nutzung zweier LC-Lagen übereinander, können die mechanischen Herausforderungen umgangen werden. Das amerikanische Militär unternahm in den 1980er Jahren einige Anstrengungen, um dreidimensionale Displays für Flugzeuge und U-Boote zu entwickeln¹¹⁵. Der Mathematiker Sombrowsky verbesserte eine Idee von Holmes [209] und präsentierte Anfang der 1990er Jahre die Idee für einen Monitor, bei dem nacheinander „kleine durchsichtige Öffnungen“ auf einer „Spezialglasscheibenfläche“ vor einem „Spezialmonitor“ auftauchen [210]. Mit der unhandlichen Wortschöpfung „Spezialglasscheibenfläche“ ist natürlich ganz einfach eine schaltbare Barrierestruktur gemeint. Der Monitor und die Barriere müssen synchronisiert zueinander so schnell schalten, dass der Bildwechsel nicht mehr wahrzunehmen ist. Dazu benötigt man aber einen Monitor mit sehr schneller Bildwiederholung. Ein solcher Bildschirm war in den 90ern als Braunsche Röhre einfacher zu beschaffen, als ein dermaßen schnelles LCD. Daher wurde auch die Idee der Abschaltung der Barriere untersucht. Der Amerikaner Eichenlaub nutzte die Barrieren als Beleuchtungslinien des Displays, die zur Beleuchtung der „Lichtventile“¹¹⁶ des LC-Panels dienten. Damit wurden ebenso wie bei einer Barriere vor dem Panel der Blick auf bestimmte Pixel in Abhängigkeit von der Betrachtungsrichtung ermöglicht. Die Bildschirme werden bis heute produziert¹¹⁷. Zu erwähnen sind noch die 3D-Displays von Sharp, die als Serienprodukt produziert und ebenfalls zwischen 2D und 3D-Modus umschaltbar waren [212]. Sharp präferierte den klassischen 3D-Aufbau, bei dem die Barriere vor dem Bildschirm angeordnet ist. Als Serienhersteller von LCDs konnte Sharp nun beide Elemente (Bildschirm und Barriere) als LC ausführen. Auch mit der potentiellen Serientauglichkeit des Sharp-3D-Displays war dieses kein Erfolg und der 3D-Monitor verschwand nach dem Abverkauf

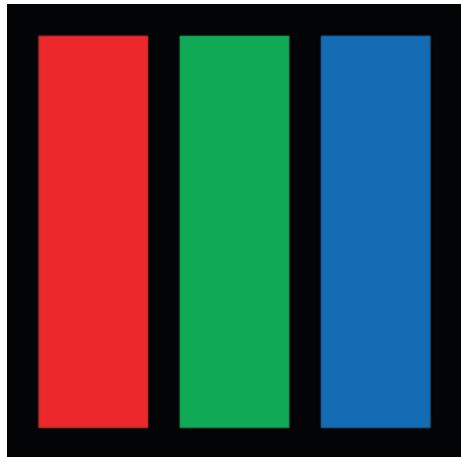
¹¹⁴Sanyo war in den 1990er Jahren ein führender Hersteller von LCDs und bis 2004 auch stark in der diesbezüglichen Entwicklung. Durch den enormen Preisdruck der 2000er Jahre geriet auch Sanyo in Bedrängnis und versuchte die Rettung des LC-Geschäftes durch ein Joint Venture mit Epson und Fokus auf kleinformatige Bildschirme. Mittlerweile ist Sanyo ein Teil von Panasonic.

¹¹⁵Davon profitierten u. a. die Unternehmen „Electronic Image Systems Inc.“ (Xenia, Ohio, 1996 von BARCO übernommen) und Dimension Technologies (Rochester, New York), die in der Folge mit einigen Veröffentlichungen und echten Displays aufwarteten.

¹¹⁶„illuminating lines and light valve“ [211].

¹¹⁷Immerhin stammt die grundlegende Idee aus dem Jahre 1980.

Abb. 4.43 RGB-Subpixel,
Grasnick (2019)



der Nullserie vom Markt. Allerdings hatte Sharp im Hintergrund durchaus an dem Thema weiter gewerkelt. Ein Sharp Barriere-System wurde im 3D-Display des Nintendo 3DS eingesetzt [213]. Nintendo selbst bevorzugte eine einfache schaltbare LC-Barriere hinter einem LC-Display vor [214]. Dadurch ist das Display bei ausgeschalteter Barriere nicht von einem herkömmlichen 2D-Display zu unterscheiden.

Auch Sharps oder Nintendos 3D-Displays nutzten reine Schwarz-Weiß-Barrieren (präzise formuliert „Transparent-Opak“). Durch die Nutzung der räumlichen Gestaltung eines LC-Pixels kann aber auch die Farbe der Pixel genutzt werden. Die Farbfilter der Subpixel teilen eines Flachbildschirms teilen jeden einzelnen Pixel in getrennte Bereiche, die von den Grundfarben Rot, Grün und Blau gebildet werden (s. Abb. 4.43).

Der Aufbau eines Pixels aus drei einzeln Elementen ist der übliche Aufbau, aber keineswegs der einzige. Auch hier gibt es Ausnahmen. Sharp nutzt beispielsweise bei der Quattron Technologie [215] ^{4¹¹⁸} Farben, um die Farbwahrnehmung zu verbessern [216]. Das israelische Unternehmen Genoa Technologies¹¹⁹ forsche an 5¹²⁰-Farb-LCDs [217] und Samsung selbst probierte sich gar an 6¹²¹ Farben [218].

Wenn man über irgendeine dieser Filteranordnung wiederum eine Barriere mit unterschiedlichen Farbfiltern legt, ergeben sich interessante Konstellationen. Bei 4D-Vision hatte man mit solchen Farbfiltern experimentiert [219]. Der Unterschied ist schnell erklärt: Die transparenten Flächen der Barriere sind nicht mehr für das gesamte sichtbare Spektrum (Weiß) durchlässig, sondern nur noch selektiv für bestimmte Wellenlängenbereiche. Das sind dann also ganz einfach Farbfilter. In der einfachsten Ausprägung lässt

¹¹⁸RGBY (red, green, blue, yellow).

¹¹⁹Übernommen von Samsung.

¹²⁰RGBYC (red, green, blue, yellow, cyan).

¹²¹RGBYCM (red, green, blue, yellow, cyan, magenta).

sich ein transparentes Farbfiltermuster drucken oder gar mit einem zweiten LC-Panel bewerkstelligen. Der Vorteil eines solchen Rasters liegt in der subjektiv höheren Auflösung. Eine Barriere kann so konstruiert werden, dass Sie über die gesamte Fläche zumindest für bestimmte Farben durchlässig sein kann.

Nachdem nun viel von der Barriere gesprochen wurde, soll abschließend dazu noch kurz auf Kaplans Theorie der Parallax-Barrieren [192], die schon mehrfach erwähnt wurde, eingegangen werden. Kaplan hatte bereits Anfang der 1950er Jahre die potentielle Verwendung von Parallaxbarrieren für Bildröhren vorhergesehen. Kaplan konnte die spätere LCD-Technologie noch nicht kennen, aber dennoch schon auf einen wichtigen Sachverhalt hinweisen. Es ist für die stereoskopische Wirkung eines Displays immer erforderlich, dass die Bildpunkte zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer definierten Anordnung vorliegen. Auch unabhängig von der Form der einzelnen Bildelemente¹²², müssen alle Bildpunkte in einem bestimmten Muster angeordnet sein. Kaplan nennt zwei unabdingbare Voraussetzungen für ein 3D-Display:

1. Alle Elemente eines Musters müssen von gleicher Form und Größe sein.
2. Alle Elemente eines Musters müssen in gleicher Ausrichtung angeordnet sein.

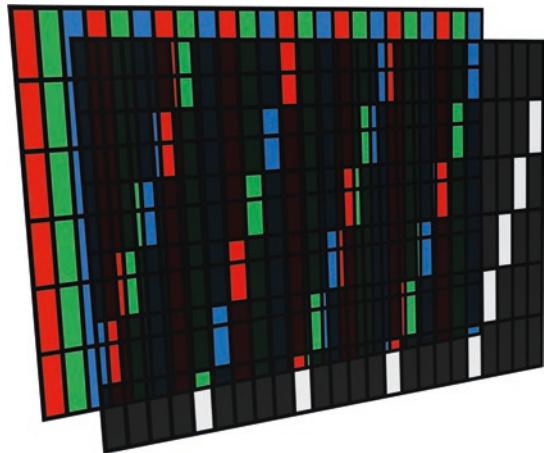
Kaplans Bedingungen werden schon bei Röhrenmonitoren trotz der einigermaßen ungenauen Anordnung der Bildpunkte¹²³ erfüllt. Natürlich muss aufgrund der unveränderlichen Barrierestruktur das analoge Fernsehsignal immer wieder nachjustiert und mit dem Raster abgeglichen werden. Mit einem digitalen Flachbildschirm ist das nicht mehr notwendig. Jeder einzelne Pixel ist nun über seine Spalten und Zeilenzuordnung eindeutig adressierbar. Dadurch treten mit zunehmender Verbreitung von Flachdisplays auch immer wieder 3D-Displays in Erscheinung. Nur als Beispiel sei hier nochmals das bereits erwähnte Sanyo-Patent genannt [208], in dem neben der mechanischen Maskenverschiebung auch eine schaltbare LC-Barriere beschrieben wurde. Wenn als Parallaxbarriere nun ein zweites Panel zum Einsatz kommt, bei dem die Farbfilter weggelassen wurden, kann anstelle einer schrägen Barriere auch eine Treppenstruktur¹²⁴ verwendet werden. In vereinfachter Form ohne Umschaltungsmöglichkeit hatte auch 4D-Vision aus Jena solche Stufen im Angebot [222]. Kaplan hatte diese Art als „open barrier arrangement, staggered“ bezeichnet (aus [192], S. 16). Üblicherweise sind die offenen Rechtecke der Barriere der Größe der Subpixel angepasst, sodass sich dem Betrachter ein farbiges Muster darbietet (s. Abb. 4.44). Wenn die Strukturen jedoch klein genug sind, sodass sich einzelne Pixel nicht mehr auflösen lassen, ergibt sich wieder ein stimmiges Bild.

¹²²Kaplan schlägt runde, quadratische, hexagonale oder rhombische Bildelemente vor.

¹²³Varianz von Bildgröße, Bildlage oder Verzerrung.

¹²⁴Nach Sanyo-Terminologie „Step Barrier“ [220] oder „Step Structure“ [221].

Abb. 4.44 LCD mit Treppenbarriere, Grasnick (2019)



4.8 Lichtfeld

Das Lichtfeld im Beleuchtungsraum

Damit aus einem flachen Bild oder Monitor ein räumlicher Eindruck entsteht, muss das von der Anzeige ausgehende Licht in unterschiedliche Raumrichtungen ausgesendet werden. Das Licht, das zu einer bestimmten Perspektive gehört, darf also nur aus dieser Perspektive gesehen werden.

Die Beschreibung der Lichtausbreitung scheint besonders in Innenräumen bei der Gebäudeplanung sinnvoll zu sein. Der Berliner Maler Magnus machte sich 1863 anlässlich der steigenden Zahl von Museen in Deutschland Gedanken, wie denn die ausgestellten Kunstwerke darin zu beleuchten seien. Als Prinzipien der Beleuchtung nannte er die „Einheit des Lichtes“¹²⁵ und denjenigen Platz „wo die Lichtstrahlen am intensivsten einfallen“ (aus [223], S. 204). Magnus beschreibt in seinem Vortrag die Lichtintensität in Abhängigkeit vom Einfallswinkel und Reflexionsgrad der Kunstobjekte. Durch geeignete Dimensionierung von Oberlicht, Fenstern und Raummaßen lassen sich die Kunstobjekte gleichmäßig und hell beleuchten. Magnus' einfache geometrische Theorie wurde von Mehmke auf Basis von Lamberts Fotometrie [224] und Wieners Beleuchtungslehre ([225], ab S. 390) intensiver beleuchtet. Mehmke übernahm Wieners Begriff des Beleuchtungsraums ([225], ab S. 401) und konstruierte darin den Beleuchtungsvektor¹²⁶. So konnte Mehmke die Beleuchtungsstärke an einer beliebigen Stelle an der Wand berechnen [226]. Mehmkes Diagramm eines Beleuchtungsraumes

¹²⁵Womit Magnus die Beleuchtung aus einer Richtung meint.

¹²⁶Der Beleuchtungsvektor beschreibt die vorherrschende Lichtrichtung.

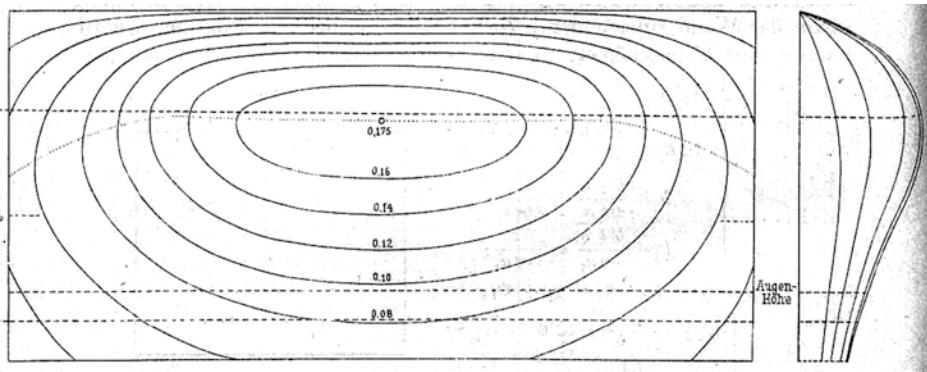


Abb. 4.45 Diagramm eines Beleuchtungsraums. (Rudolf Mehmke (1898) aus [226], S. 52)

mit Deckenlicht kann durchaus als Darstellung eines Lichtfeldes gelten (s. Abb. 4.45). Die Linien des Diagramms geben darin die Orte gleicher Helligkeit (Isoluminanz) an.

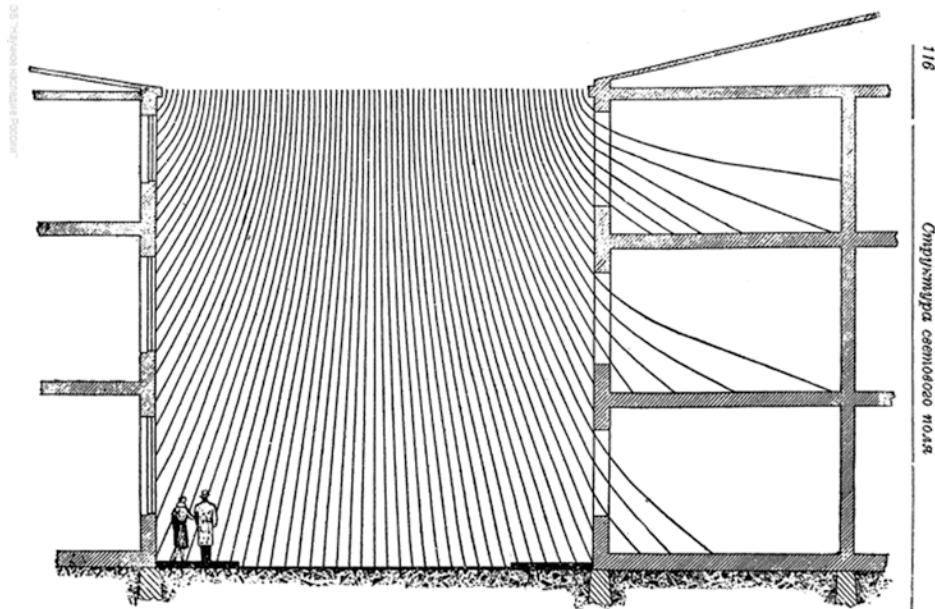
Der russische Physiker Gershun, der sich intensiv mit der Fotometrie beschäftigt hatte¹²⁷ machte in den 1930er Jahren den Vorschlag die Ausbreitung des Lichtes in Form eines Feldes zu beschreiben für das er den Begriff „Lichtfeld“¹²⁸ benutzt [228]. Die grundsätzliche Idee in Gershuns Konzept des Lichtfeldes ist eine fotometrische Betrachtung der Energieverteilung des Lichtes im Raum. Damit kann eine Ausbreitung des Lichtes, die über die Intensität an jedem einzelnen Ort messbar ist, geometrisch beschrieben werden. Die nachfolgende Illustration (Abb. 4.46) zeigt ein solches Lichtfeld, das in diesem Fall durch die Sonne (nicht im Bild) verursacht wird. Die Linien illustrieren hier das, was Gershun mit einem Lichtfeld gemeint hat. Die Linien im Bild zeigen die Strahlungsdichte und beschreiben damit die richtungsabhängige Intensität des Lichtes. Je größer der Abstand der Linien zueinander ist, desto geringer ist die Intensität an diesem Ort.

Gershuns Lichtfeld wurde außerhalb der Sowjetunion vor allem mit der englischen Übersetzung seiner Schrift „The Light Field“ [229] durch Moon und Timoshenko bekannt. Moon und Eberle Spencer entwickelten aus Mehmkes Beleuchtungsvektoren und Gershuns Lichtfeld das „photic field“ [230]. Der Term „photisches“ „photonisches“ Feld hat sich nicht durchgesetzt, die Idee des Lichtfeldes schon. Adelson und Bergen beschrieben später das Lichtfeld als plenoptische¹²⁹ Funktion [231]. Wenn die plenoptische Funktion die gesamte Lichtverteilung im Raum beschreiben soll, sind dazu

¹²⁷S. z. B. „Ausgewählte Arbeiten zur Photometrie und Lichttechnik“ [227] oder „Lichtfeld“, worin er sich u. a. auch mit Mehmkes Arbeiten beschäftigt hatte, s. [228], S. 159.

¹²⁸„Svetovoye Pole“ (Lichtfeld), die absolute Zuschreibung auf Gershun ist jedoch insofern problematisch, da der Begriff Lichtfeld in Mikroskopie und Photometrie schon lange vorher benutzt wurde.

¹²⁹Plenoptisch – das visuell Wahrnehmbare vollständig erfassend.



Pic. 47.

Abb. 4.46 Struktura svetovogo polya, Lichtfeldstruktur. (Andrey Aleksandrovich Gershun (1936) aus [228], S. 116)

alle Parameter des Lichtes zu beachten. Zunächst gilt die Vereinbarung, dass die Lichtstrahlung an einer Position betrachtet wird und damit von den drei Raumdimensionen x , y und z abhängig. Geometrisch vereinfacht kann für jeden Punkt im Raum eine Addition der Vektoren aller ankommenden Lichtquellen errechnet werden, was zu einem neuen Vektor an eben diesem Punkt führt. Die Länge des Vektors zeigt die jeweilige Intensität der Strahlung an, zwei Raumwinkel¹³⁰ die Richtung. Schon jetzt hätte man eine Beschreibung der Intensität im Raum, die von fünf Parametern¹³¹ abhängt und dadurch eben fünfdimensional wird. In einem dynamischen System kann sich die Beleuchtungssituation ändern, wodurch noch die Zeit als Einflussgröße hinzukommt. Da die reale Welt nicht monochromatisch ist, müssen noch die Farben oder einfach über die Wellenlänge des Lichts in Betracht gezogen werden, wodurch nun insgesamt sieben Dimensionen in die Rechnung einfließen (und das auch nur, wenn man die Phase oder und den Polarisationszustand des Lichts vernachlässigt). Das scheint nicht unbedingt eine Vereinfachung zu sein. Levoy und Hanrahan, zwei amerikanische Computerwissenschaftler,

¹³⁰Horizontalwinkel (Azimut) und Vertikalwinkel (Elevation).

¹³¹ x , y , z , Azimut, Elevation.

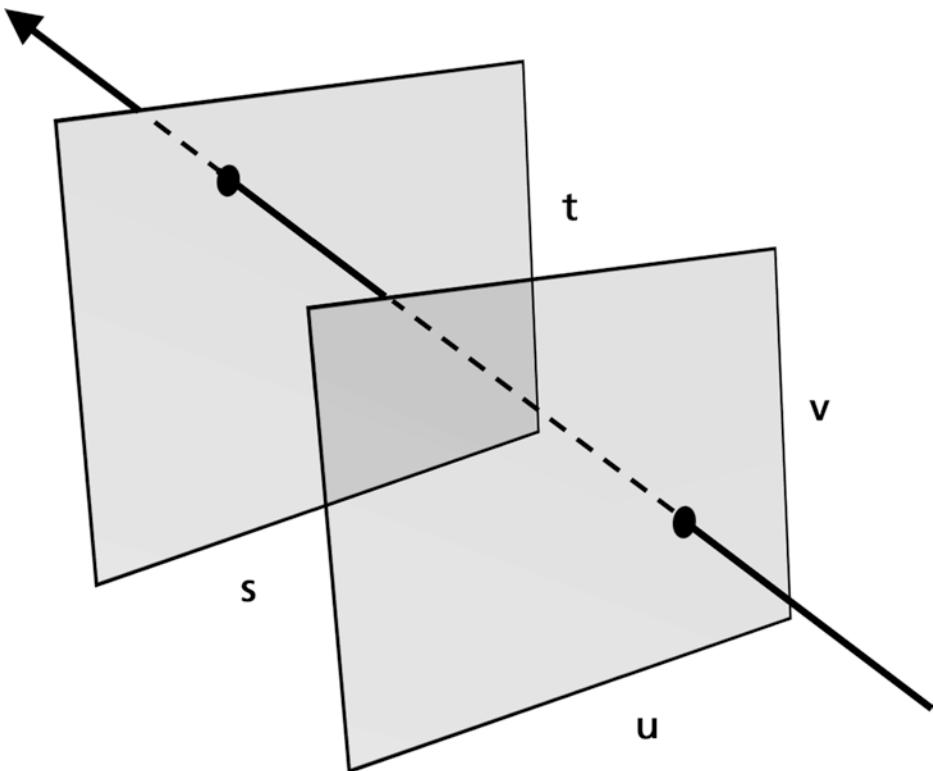


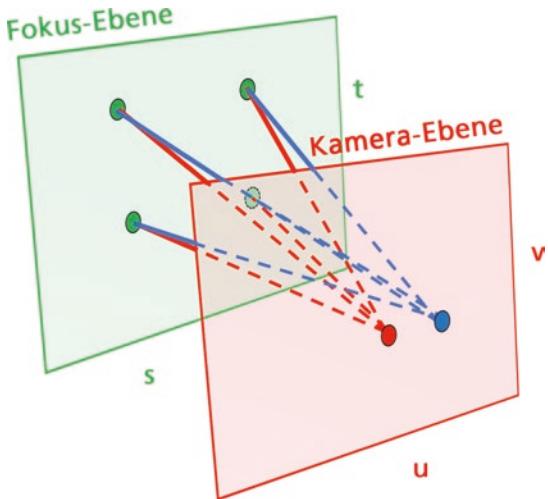
Abb. 4.47 Lichtstrahl durch 2 Platten, Grasnick (2019)

schlügen Ende der 1990er Jahre eine effiziente Berechnung vor [232]¹³². Grundsätzlich gingen sie von der Definition aus, dass die Strahlung eines Lichtpunktes in eine bestimmte Richtung gerichtet ist. Das entspricht der plenoptischen Funktion von Adelson und Bergen. Die Strahlungsleistung des Lichtes entlang einer geraden Linie verändert sich aber nur dann, wenn das Licht durch irgendetwas blockiert wird. Diese Einschränkung ist sicherlich für die meisten Situationen ausreichend und erlaubt nun die Beschreibung durch vier Parameter. Dazu werden einfach zwei Platten in den Raum gestellt und von einem Punkt der einen Platte eine gerade Linie durch einen leeren Raum zu einem anderen Punkt der zweiten Platte gezogen (s. Abb. 4.47).

Ein Lichtstrahl geht durch einen Punkt der ersten Platte durch einen anderen Punkt auf der zweiten Platte hindurch. Mit einem einzelnen Lichtstrahl kann noch keine

¹³²Eine schöne Zusammenfassung zum Thema hat Levoy selbst in 2006 gegeben [233]. Interessant ist in diesem Artikel aber auch Levloys Vermutung, dass in 25 Jahren die meisten fotografischen Kameras Lichtfeldkameras sein werden (also 2031 – man wird sehen).

Abb. 4.48 Light slab mit mehreren Lichtstrahlen, Grasnick (2019)



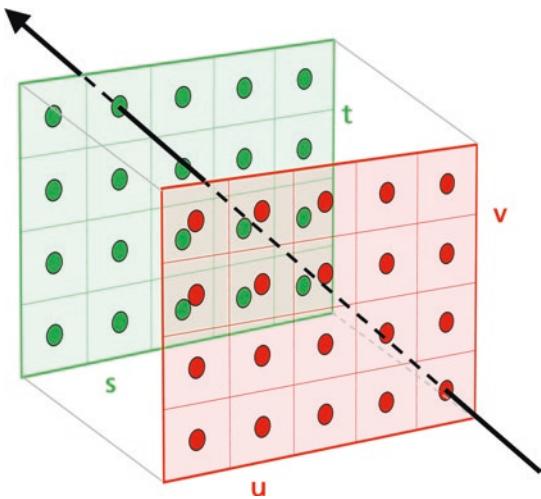
Szene beschrieben werden, dazu benötigt man viele Lichtstrahlen. Levoy und Hanrahan nennen den Raum zwischen den beiden Platten, indem nun viele Lichtstrahlen von Punkt zu Punkt reisen, ganz einfach „light slab“¹³³ [232]. Das wird vielleicht ein wenig klarer, wenn man mehrere Lichtstrahlen in die Lichtscheibe einzeichnet (Abb. 4.48). In der Skizze ist ein Modell des Lichtfeldes illustriert, wie es sich bei einer Kameraaufnahme, gleichgültig ob mit realen Kameras oder virtuellen Kameras in der Computergrafik, darstellen würde. Die rote Ebene repräsentiert die Kamera-Ebene, aus der nun von zwei unterschiedlichen Punkten (rot und blau) auf die das Objekt (illustriert durch die grüne Fokus-Ebene) geschaut wird. Hier werden beispielhaft nur grüne Punkte dargestellt.

Die praktische Aufnahme einer realen Szene als Lichtfeld setzt eine Vielzahl unterschiedlicher Kameraposition voraus, was immer mit einem gewissen Aufwand einhergeht. Die Aufnahme bewegter Szenen bedingt zudem die synchrone Aufnahme der Szene mit allen Kameras gleichzeitig, was den Aufwand noch erhöht. An der Stanford University wurde unter Levloys Leitung das „Stanford Multiple Camera Array“ aufgebaut [234]. Dazu wurden 100 preiswerte Kameras in einer zweidimensionalen Anordnung aufgebaut und synchronisiert, wodurch nicht nur hohen Datenraten entstanden, sondern auch ein beachtlicher Aufbau¹³⁴. Dieser nur begrenzt transportable Aufbau wurde nach einer Idee von Ren Ng (von dem schon die Rede war) in eine hochmobile und praktikable Kamera umgesetzt [165]. Hierbei verwendet Ng im Prinzip Lippmanns

¹³³Lichtplatte, wobei mit „slab“ auch eine dicke Scheibe gemeint ist (z. B. „slab of beef“).

¹³⁴Bei einer Seitenlänge von 30 mm für jedes Kameraboard (s. [235], S. 29) dürfte das System eine Mindestgröße von 40×40 cm gehabt haben, zur Bedienung der 100 Kameras waren 4 Computer notwendig.

Abb. 4.49 Lumigraph. (Nach Gortler, Grasnick 2019)



Linsenraster [236] in Verbindung mit Ives großer Parallaxlinse [189] und bringt diese Komponenten in einer Digitalkamera unter.

Zeitgleich mit Levoy „light slab“ präsentierte Gortler seinen „Lumigraph“. Die grundsätzliche Idee ist darin in etwa die gleiche wie bei Levoy und Hanrahan. Ein schönes Modell bei Gortler ist jedoch der Würfel, der ein zu betrachtendes Objekt umgibt. Wenn man sich davon immer zwei gegenüberliegende Flächen betrachtet, erhält man wieder Levoy „light slab“¹³⁵. Hier macht Gortler einen überaus praktikablen Vorschlag. Er teilt beide Flächen in Raster auf und erhält so eine übersichtliche Anzahl an zu berechnenden Lichtstrahlen. Im Bild Abb. 4.49 ist der Lumigraph-Würfel abgebildet. Auf zwei gegenüberliegenden Seiten sind Rasterpunkte aufgezeichnet und ein einzelner Strahl, der zwei definierte Punkte verbindet und so beschrieben werden kann.

Im Prinzip können nun von irgendeinem Punkt außerhalb des Lumographs durch die Rasterpunkte jeweils zweier Flächen die entsprechenden Strahlen gezogen werden. Nicht von ungefähr erinnert das an Bettinis Konstruktion der Anamorphosen (s. Abb. 2.55), denn hier findet in etwa der gleiche Prozess statt. Aus einem bestimmten Kamera- oder Augpunkt wird geometrisch immer eine etwas andere Perspektive gesehen. Jede Position im Raum ergibt eine etwas andere Perspektive. Hat man für ein Lichtfeld einmal aufgezeichnet, kann man unzählige Perspektiven aus beliebigen anderen Positionen errechnen. Dies sind dann zweidimensionale Schnitte aus dem vierdimensionalen Lichtfeld.

¹³⁵Mit der Einschränkung, dass Gortlers Flächen parallel zueinander stehen, Levoy's Flächen dagegen beliebig im Raum positionierbar sind.

Physikalische Felder

Das althochdeutsche Wort „feld“, das ursprünglich ein freies, flaches und unbewaldetes Stückchen Land bezeichnete, wurde ab der Mitte des 19. Jahrhunderts zunehmend zur Beschreibung der Fernwirkung von Kräften verwendet.

Schon Leonardo da Vinci erkannte, dass sich das von einer Lichtquelle ausgehende Licht geradlinig und „pyramidenförmig“¹³⁶ ausbreitet. Die wahrgenommene Lichtintensität hängt dabei sowohl von der Beleuchtung als auch von der Betrachterposition ab.

Wheatstone spricht beinahe unbewusst von einem „field of vision“ und meint damit den Raum, der von den Augen des Betrachters gesehen werden kann [238]. Ein direkter Vergleich mit auf Entfernung wirkenden Kräften¹³⁷ wird aber schon von Faraday gezogen [240], der den Feldbegriff mit dem Magnetismus verknüpft [241]. Damit war die Idee des elektromagnetischen Feldes geboren.

Heute versteht man unter einem Feld die Verteilung einer physikalischen Größe in einem bestimmten Raum.

Ein Lichtfeld kann nicht nur aufgenommen, sondern auch wiedergegeben werden. Die bekannteste Vorrichtung dafür ist Lippmanns Integralfotografie. Bekanntermaßen waren die Bilder recht klein, sodass der räumliche Eindruck auf die Größe einer Postkarte beschränkt war. Die Umsetzung auf größere Anzeigen bedingt eine hohe Auflösung, die mit der Weiterentwicklung der LC-Technik möglich wurde. Darauf basierend wurden die Möglichkeiten zur Anwendung der Integralfotografie als 3D-Display untersucht (s. z. B. [242, 243]) und auch einige Prototypen hergestellt (s. z. B. [244 oder 245]). Die Problematik solcher Technologien liegt in der immer noch begrenzten Auflösung verfügbarer Anzeigesysteme. Wenn man jedoch auf die Nutzung der vertikalen Parallaxe verzichtet und eine größere Anzahl von Perspektiven nur horizontal miteinander verschachtelt, können die Vorteile einer Integralfotografie¹³⁸ vielleicht auch in größeren Displays genutzt werden. Die Sunny Ocean Studios hatten dafür mit 64 Perspektiven experimentiert, die Tokyo University mit 128 (nun genannt „Super multi-view“, s. [246]), der Autor mit bis zu mehreren Millionen (genannt „Hyperview“ s. [247, 248 oder 249]). Das Konzept des Hyperview erlaubt es jedem Pixel eines autostereoskopischen Displays (egal ob Linsenraster oder Barriere) einen Ausschnitt aus einer etwas anderen Perspektive zuzuweisen.

¹³⁶„Licht und Schatten tun ihren Dienst in Form von Pyramiden“ (aus [237], S. 302).

¹³⁷Wobei Faraday hier und an anderer Stelle von „magnetic line of forces“ spricht [239].

¹³⁸Neben der Vielzahl der Einzelansichten und dem daraus resultierendem freien Betrachtungspunkt fällt besonders das Fehlen des stereoskopischen/autostereoskopischen Akkommodations-Konvergenz-Konfliktes positiv ins Gewicht. Man kann bei einer Integralfotografie tatsächlich auf die Luftbilder der 3D-Objekte fokussieren (und nicht nur auf den Bildschirm, wie in der Stereoskopie).

Literatur

1. von Helmholtz H. Populäre wissenschaftliche Vorträge. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn; 1871.
2. Rosenbach O. Ueber die monokulare Vorherrschaft beim binokularen Sehen. Münchener Med Wochenztschrift. 1903;30:1290–2.
3. Buxton CE, Crosland HR. The concept eye-preference. Am J Psychol. 1937;49:458.
4. Bourassa DC, McManus IC, Bryden MP. Handedness and eye-dominance: a meta-analysis of their relationship. Laterality. 1996;1:5–34.
5. Li J, Lam CSY, Yu M, Hess RF, Chan LYL, Maehara G, et al. Quantifying sensory eye dominance in the normal visual system: a new technique and insights into variation across traditional tests. Invest Ophthalmol Visual Sci. 2010;51:6875.
6. Carey DP. Vision research: losing sight of eye dominance. Curr Biol. 2001;11:R828–30.
7. Goersch H. Sensorische Abweichungen vom idealen Binokularsehen. Neues Optikerjournal. 1979;2:7–13.
8. Kundert G, Marty I. Welchen Einfluss hat das Führungsauge auf die Abweichung am Valenztest? DOZ. 2005;6:44–8.
9. Stollenwerk G. Möglichkeiten und Grenzen bei der Anwendung des neuen reduzierten Valenztestes. Neues Optikerjournal. 1999;9:26–31.
10. Souman JL, Frissen I, Sreenivasa MN, Ernst MO. Walking straight into circles. Curr Biol. 2009;19:1538–42.
11. Scheiner C. Oculus hoc est fundamentum opticum. Innsbruck: Daniel Agricola; 1619.
12. von Helmholtz H. Handbuch der physiologischen Optik. Leipzig: Leopold Voss; 1867.
13. Bach L. Pupillenlehre. Berlin: S. Karger; 1908.
14. Marg E, Morgan MW Jr. The pupillary near reflex. The relation of pupillary diameter of accommodation and the various components of convergence. Optom Vis Sci. 1949;26:183–98.
15. Zuber BL. The control of eye movements. In: Bach-y-Rita P, Collins CC, Smith-Kettlewell Institute of Visual Sciences, Stockton, Calif, Herausgeber. The control of eye movements. New York: Academic; 1971. S. 447–71.
16. Westheimer G, Blair SM. The parasympathetic pathways to internal eye muscles. Invest Ophthalmol. 1973;12:193–7.
17. Schultheis H. Die Pupillengöße als Index zur Online-Erfassung der kognitiven Belastung. 11 GI-Workshop „Adaptivität und Benutzermodellierung in interaktiven Softwaresystemen“. 2003.
18. Winn B, Whitaker D, Elliott DB, Phillips NJ. Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects. Invest Ophthalmol Vis Sci. 1994;35:1132–7.
19. Curcio CA, Sloan KR, Kalina RE, Hendrickson AE. Human photoreceptor topography. J Comp Neurol. 1990;292:497–523.
20. Diels H. Die Fragmente der Vorsokratiker. 3. Aufl. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung; 1912.
21. Aristoteles. Problemata Physica. 4., gegenüber der 2., durchges., unveränd. Aufl. Berlin: Akademie-Verlag; 1991.
22. Wilde E. Geschichte der Optik, vom Ursprunge dieser Wissenschaft bis auf die gegenwärtige Zeit. Berlin: Rücker & Püchler; 1838.
23. Siebert H. Die ptolemäische Optik in Spätantike und byzantinischer Zeit: historiographische Dekonstruktion, textliche Neuerschließung, Rekontextualisierung. Stuttgart: Steiner; 2014.

24. Alhazen W. Opticae thesaurus. Risner F, Herausgeber. Basel: Episcopios; 1572.
25. Kepler J. Dioptrik oder Schilderung der Folgen, die sich aus der unlängst gemachten Erfindung der Fernrohre für das Sehen und die sichtbaren Gegenstände ergeben. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1904.
26. Descartes R. Discours de la methode pour bien conduire sa raison, & chercher la verité dans les sciences: plus la dioptrique et les meteores, qui sont des essais de cette methode. Paris: Theodore Girard; 1657.
27. Smith R. A compleat System of Opticks. Cambridge: Cornelius Crownfield; 1738.
28. Smith R. Vollständiger Lehrbegriff der Optik. Altenburg: Richtersche Buchhandlung; 1755.
29. Dornblüth O. Medizin: Horopter [Internet]. Klinisches Wörterbuch. 1927. <http://www.textlog.de/14790.html>. Zugegriffen: 18. Sept. 2016.
30. Aguilonius F. Opticorum Libri Sex. Antwerpen: Apud Viduam et Filios Moreti; 1613.
31. von Baer KE. Vorlesungen über Anthropologie. Königsberg: Gebrüder Bornträger; 1924.
32. Vieth GUA. Versuch einer Encyklopädie der Leibesübungen. Berlin: Carl Ludwig Hartmann; 1795.
33. Vieth GUA. Ueber die Richtung der Augen. Ann Phys. 1818;58:233–53.
34. Müller J. Von dem natürlichen Doppelzehen. Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes des Menschen und der Thiere, nebst einem Versuch über die Bewegungen der Augen und über den menschlichen Blick. Leipzig: Cnobloch; 1826. S. 165–204.
35. Hering E. Vom binokularen Tiefesehen. Kritik einer Abhandlung von Helmholtz über den Horopter. Beitr Physiol. 5. Heft/1864;347–358.
36. Hering E. Der empirische Horopter. Beitr Physiol. 1863;3:200–24.
37. Hillebrand F. Die Stabilität der Raumwerte auf der Netzhaut. Z Psychol Physiol Sinnesorgane. 1893;5:1–60.
38. Panum PL. Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel: Schwerische Buchhandlung; 1858.
39. Richards W. Stereopsis and stereoblindness. Exp Brain Res. 1970;10:380–8.
40. Wheatstone C. Contributions to the physiology of vision. –Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. Philos Trans R Soc Lond. 1838;128:371–94.
41. Dodgson NA. Variation and extrema of human interpupillary distance. In: Woods AJ, Merritt JO, Benton SA, Bolas MT, Herausgeber. Proc SPIE. 2004. S. 36–46.
42. Mach E. Untersuchungen über den Zeitsinn des Ohres. In: Moleschott J, Herausgeber. Untersuchungen zur Naturlehre der Menschen und der Thiere. Gießen: Emil Roth; 1870. S. 181–200.
43. Edison TA. Caveat 110: Kinetoskop [PT031AAA1; TAEM 113:238] [Internet]. Orange. 1888. <http://edison.rutgers.edu/images/ei/ei0235.jpg>.
44. Wittmann M, Pöppel E. Hirnzeit: Wie das Gehirn die Zeit macht. Kunstforum Int. 2000;151:85.
45. Pöppel E. Lost in time: a historical frame, elementary processing units and the 3-second window. Acta Neurobiol Exp. 2004;64:295–302.
46. Carmack J. Latency mitigation strategies [Internet]. 2014. <http://archive.is/udOC9#selection-595.0-595.29>. Zugegriffen: 19. Sept. 2016.
47. Howarth PA, Costello PJ. The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system. Displays. 1997;18:107–16.
48. DiZio P, Lackner JR. Motion sickness side effects and aftereffects of immersive virtual environments created with helmet-mounted visual displays. The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements. Orlando, Florida verlegt von NATO RTO HFM; 2000;1. S. 11/1–11/3.

49. Carbon C-C, Hesslinger VM. Da Vinci's Mona Lisa entering the next dimension. Perception. 2013;42:887–93.
50. Grasnick A. Hyperview: Maximalwert binokularer Perspektiven im Bildraster autostereoskopischer Raumbildsysteme. Hagen: FernUniversität Hagen; 2017.
51. Da Vinci L, Della Bella S. Trattato della pittura, Bd. 1792. Florenz: Pagani & Grazioli; 1792.
52. Talbot WHF. Photographic Pictures. Patent, GB 8842; 1841.
53. Dingler JG, Herausgeber. XCVI. Talbot's Verfahren die photogenischen Gemälde darzustellen. Polytech J. 1839;71:468–77.
54. Talbot WHF. LXXVI. Facts relating to optical science. No. IV. The London, Edinburgh, and Dublin Philos Mag J Sci. 1836;IX:401–7.
55. Daguerre LJM. Geschichte und Beschreibung des Verfahrens der Daguerreotypie und des Dioramas. Karlsruhe: A. Bielefeld; 1839.
56. Niépce JN. Die Heliographie. Das Daguerreotyp und das Diorama, oder genaue und authentische Beschreibung meines Verfahrens und meiner Apparate zu Fixirung der Bilder der Camera obscura und der von mir bei dem Diorama angewendeten Art und Weise der Malerei und Beleuchtung. Stuttgart: Metzlersche Buchhandlung; 1839.
57. Wheatstone C. The Bakerian lecture.— Contributions to the physiology of vision.— Part the second. On some remarkable, and hitherto unobserved Phenomena of Binocular Vision (continued). Philos Trans R Soc London. London: Richard Taylor and William Francis; 1852. S. 1–17.
58. Moser L. Ueber das Auge. Mechanik Allgemeine Gesetze der Wellenbewegung Literatur des Magnetismus und der Elektricität Ueber das Auge. Berlin: Veit & Comp.; 1844.
59. Stoeterogge BL. Recueil von allerhand Collectaneis und Historien, auch Moral-Curieux-Critic- und lustigen Satyrischen Einfällen Zu Entretenirung einer Galanten Conversation. Hannover; 1721.
60. Kohlhans JC. Neu-erfundene mathematische und optische Curiositäten. Leipzig: Friederich Lankisch; 1677.
61. Brewster D. An Account for a new Stereoscope. Report of the Nineteenth Meeting of the British Association for the Advancement of Science, Section Mathematics and Physics, Notices and Abstracts. London: John Murray; 1849. S. 6–7.
62. Brewster D. The Stereoscope: its history, theory, and construction with its application to the fine and useful arts and to education. London: John Murray; 1856.
63. Maxwell JC. The scientific papers of James Clerk Maxwell. Niven WD, Herausgeber. New York: Cambridge University Press & Dover Publications; 1890.
64. Koschnitzke C, Mehnert R, Quick P. Faszinierende Natur, dreidimensional. Stuttgart: DRW-Verlag; 1983.
65. Bernier RV. Three-dimensional motion picture applications. J Soc of Motion Picture Eng. 1951;56:599–612.
66. Starkman D, Dennis J. Another chance for over/under viewing. Stereo World. 1992;19:32–3.
67. Rollmann W. Notiz zur Stereoskopie. Ann Phys Chem. 1853;165:350–1.
68. Rollmann W. Zwei neue stereoskopische Methoden. Ann Phys Chem. 1853;166:186–7.
69. d'Almeida J-C. Nouvel appareil stéréoscopique. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Paris: Bachelier; 1858.
70. Davanne M. RAPPORT au nom du Comité des Constructions et de Beaux-Arts, sur les IMAGES DITES ANAGLYPHES. Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale. Paris; 1894. S. 475.
71. Jorke H, Fritz M. Stereo projection using interference filters. In: Woods AJ, Dodgson NA, Merritt JO, Bolas MT, McDowall IE, Herausgeber. 2006. S. 60550G. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.650348>. Zugegriffen: 11. Aug. 2016.

72. von Frisch K. Die Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen. *Experientia*. 1949;5:142–8.
73. Hegedüs R, Åkesson S, Wehner R, Horváth G. Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies. *Proc R Soc A: Math Phys Eng Sci*. 2007;463:1081–95.
74. Bartholinus E. Erasmi Bartholini Experimenta crystalli islandici disdiaclastici: quibus mira et insolita refractio detegitur. *Hafinae (Kopenhagen)*: Danielis Paulli; 1670.
75. Huygens C. *Traité de la lumière*. Leyden: Pierre Vander; 1690.
76. Malus M. Sur une propriété de la lumière réfléchie. *Mémoires de physique et de chimie*. Paris: Bernard; 1809.
77. Malus M. *Théorie de la double réfraction de la lumière*. Paris: Baudouin; 1810.
78. Anderton J. Method by which pictures projected upon screens by magic lanterns are seen in relief. Patent, US 542,321. 1895.
79. Herapath WB. On the optical properties of a newly-discovered salt of quinine, which crystalline substance possesses the power of polarizing a ray of light, like tourmaline, and at certain angles of rotation of depolarizing it, like selenite. *Philos Mag Ser*. 1852;4(3):161–73.
80. Herapath WB. On the manufacture of large available crystals of sulphate of iodo-quinine (her-apathite) for optical purposes as artificial tourmalines. *Philos Mag Ser*. 1853;4(6):346–51.
81. Bernauer F. Polarisationsvorrichtung. Patent, DE 547 429. 1932.
82. Wempe J. Eigenschaften und astronomische Anwendungsmöglichkeiten von Polarisationsfiltern. *Astron Nachr*. 1939;269:331–6.
83. Giesen R. Drittes Reich: Schon zu Nazi-Zeiten wurde an 3D-Filmen gearbeitet – DIE WELT [Internet]. 2011. <http://www.welt.de/kultur/history/article12578466/Schon-zu-Nazi-Zeiten-wurde-an-3D-Filmen-gearbeitet.html>. Zugegriffen: 14. Aug. 2016.
84. Hagemann PA. Der 3D Film. Stiftung Deutsche Kinemathek, Herausgeber. München, Monika Nüchtern; 1980.
85. Spörer M. Die ästhetisch-narrativen Dimensionen des 3D-Films Neue Perspektiven der Stereoskopie. Wiesbaden: Springer VS; 2016.
86. Land EH, Friedman JS. Polarizing refracting bodies. Patent, US 1,918,848. 1933.
87. Kaempffert W. Science: the evolution of the scientific museum; An event in New York points to the trend toward the dynamic exhibit. *New York Times*. New York. 16. Februar 1936.
88. Norling JA. The stereoscopic art (a reprint). *J Soc Motion Pict Eng*. 1953;60:268–308.
89. Norling JA. Three-dimensional motion pictures. *J Soc Motion Pict Eng*. 1939;33:612–34.
90. Wesemann W. Sehlust und Sehfrust – Sehprobleme bei 3D-Kino und 3D-Fernsehen, Teil I. *SMPTE J*. 1994;103:522.
91. Land EH. Polarizing optical system. Patent, US 2,099,694. 1937.
92. Walworth VK. History of polarized image stereoscopic display. In: Proc. SPIE 8648 Woods AJ, Holliman NS, Favalora GE, Herausgeber. 2013. S. 864804.
93. Lipton L, Berman A, Meyer LD. Achromatic liquid crystal shutter for stereoscopic and other applications. Patent, US 4,884,876. 1989.
94. Lipton L, Berman A. Push-pull liquid crystal modulator for electronic stereoscopic display. In: Robbins WE, Herausgeber. 1988. S. 31–6. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1251451>. Zugegriffen: 20. Aug. 2016.
95. Faris SM. Electro-optical display system for visually displaying polarized spatially multiplexed images of 3-D objects for use in stereoscopically viewing the same with high image quality and resolution. Patent, US 5,537,144. 1996.
96. Victor Company of Japan J. The Xpol Circular Polarizing System used by JVC enables natural 3D pictures [Internet]. JVC's 3D technology latest 3D technologies Xpol® Circular Polarizing

- System. 2009. <http://pro.jvc.com/pro/microsite/3d/technology/xpol.html>. Zugegriffen: 21. Aug. 2016.
97. LG Display. Film Patterned Retarder (FPR) 3D Fact Sheet [Internet]. LG Display. 2013. http://lgnewsroom.com/wp-content/uploads/2013/04/FPR_3D_Fact_Sheet.pdf.
98. Lim YJ, Yu JH, Song KH, Lee M-H, Ren H, Mun B-J, et al. Film patterned retarder for stereoscopic three-dimensional display using ink-jet printing method. Opt Express. 2014;22:22661.
99. Walker G. Display week 2014 review: touch technology. Inform Display. 2014;30:40–5.
100. Woods AJ. Crosstalk in stereoscopic displays: a review. J Electron Imaging. 2012;21:040902.
101. Victor Company of Japan J. DT-3D24G1 DT-3D24G1Bedienungsanleitung. JVC. 2011.
102. Hammond L. Stereoscopic motion picture. Patent, US 1,435,520. 1922.
103. Puchalski S. Remembering The Selwyn [Internet]. Shock Cinema Magazine. 2007. <http://www.shockcinemamagazine.com/selwyn.html>. Zugegriffen: 20. Aug. 2016.
104. New York Tribune. Teleview will bring stereoscopic movie to the Selwyn Theater. New York Tribune. New York. 17. Dezember 1922;8.
105. Lipton L. Large-screen electro-stereoscopic displays. In: Proc. SPIE 1255 Bleha Jr. WP, Herausgeber. 1990. S. 108–13.
106. ELSA AG. Die neue 3D-Brille ELSA 3D REVELATOR ist der Schlüssel zur dritten Dimension | Pressemitteilung [Internet]. 1999. <http://presseservice.pressrelations.de/pressemitteilung/die-neue-3dbrille-elsa-3d-revelator-ist-der-schluesself-zur-dritten-dimension-7853.html>. Zugegriffen: 21. Aug. 2016.
107. XPAND. XPAND 3D Cinema System – XPAND [Internet]. 2016. <http://www.xpand.me/products/3d-cinema-system/>. Zugegriffen: 21. Aug. 2016.
108. Samsung. Samsung TV-Zubehör: Batteriebetriebene 3D-Active-Shutter-Brille SSG-P1002 [Internet]. 2016. <http://www.samsung.com/de/consumer/tv-av/accessories/tv-accessories/SSG-P1002/XC>. Zugegriffen: 21. Aug. 2016.
109. Wolf M. Katalog von 1053 stärker bewegten Fixsternen. Veroeffentlichungen der Badischen Sternwarte zu Heidelberg. 1919;7.
110. Pulfrich C. Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie. Die Naturwissenschaften. 1922;10:553–64.
111. Beard TD. Low differential 3-D viewer glasses and method with spectral transmission characteristics to control relative intensities. Patent, US 4,836,647. 1989.
112. Free J. 3-D TV. Popular Science. Juni 1988;232.
113. Der Spiegel. Wiederkehr der Pappbrille. Der Spiegel. 12. Oktober 1998;1998.
114. Lipton L. Foundations of the stereoscopic cinema. New York: Van Nostrand Reinhold; 1982.
115. Holliman N. Three-dimensional display systems. Handbook of optoelectronics. New York: Taylor & Francis; 2006.
116. Dove HW. Beschreibung mehrerer Prismen stereoskope und eines einfachen Spiegelstereoskops. In: Poggendorff JC, Herausgeber. Annalen der Physik und Chemie. Leipzig: Johann Ambrosius Barth; 1851. S. 183–9.
117. Julesz B. Binocular depth perception of computer-generated pattern. Bell Syst Tech J. 1960;39:1125–62.
118. Tyler CW, Clarke MB. Autostereogram. In: Proc. SPIE 1256 Merritt JO, Fisher SS, Herausgeber. Santa Clara; 1990. S. 182.
119. Baccei T. Das magische Auge: dreidimensionale Illusionsbilder. München: Ars Edition; 1994.
120. Newton I. A letter of Mr. Isaac Newton, ... containing his new theory about light and colors. Philos Trans R Soc Lond. 1672;80:3075–87.
121. Brewster D. Notice of a chromatic stereoscope. In: Brewster D, Taylor R, Kane R, Francis W, Herausgeber. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. London: Taylor & Francis; 1852.

122. Steenblik RA. Stereoscopic process and apparatus. Patent, US 4,597,634. 1986.
123. Steenblik RA. The chromostereoscopic process: a novel single image stereoscopic. In: Proc. SPIE 0761 McAllister DF, Robbins WE, Herausgeber. 1987. S. 27–34.
124. Chromatek. Chromadepth3D – a brand-new 3D experience [Internet]. 2016. <http://chromatek.com/>. Zugegriffen: 13. Aug. 2016.
125. Schemali L, Eisemann E. ChromoStereoscopic rendering for trichromatic displays. ACM Press; 2014; 57–62.
126. Bailey M, Clark D. Using ChromaDepth to obtain inexpensive single-image stereovision for scientific visualization. J Graph Tools. 1998;3:1–9.
127. Buerger JE. French daguerreotypes. Chicago: University of Chicago Press; 1989.
128. Claudet A. On the stereomonoscope, a new instrument by which an apparently single picture produces the stereoscopic illusion. Proc R Soc Lond. 1857;9:194–6.
129. Schlömilch O, Witzschel B, Cantor M, Herausgeber. Das Stereomonoskop von Claudet. Z Math Phys. 1859;4:169–70.
130. von Rohr M. Die binokularen Instrumente. Berlin: Julius Springer; 1907.
131. von Rohr M, Englisch E. Der Verant, ein neues Instrument, um Photogramme vom richtigen Standpunkt zu betrachten. Z Wiss Photographie Photophys Photochem. 1904;2:188–9.
132. von Rohr M. Die Brille als optisches Instrument. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1911.
133. Carl Zeiss Jena. Der Doppelverant. Beschreibung und Gebrauchsanweisung. Berhanrd Voeplius Jena; 1902.
134. von Rohr M. Reflecting instruments annulling the perception of depth in binocular vision. Patent, GB 916. 1907.
135. Ames A. The illusion of depth from single pictures. J Opt Soc Am. 1925;10:137.
136. Vishwanath D. Induction of monocular stereopsis by altering focus distance: a test of Ames's hypothesis. i-Perception. 2016;7:204166951664323.
137. Itelson WH. The Ames demonstrations in perception. Princeton: Princeton University Press; 1952.
138. Euklid, Dee J. The elements of geometrie of the most auncient philosopher Euclide of Megara. Faithfully (now first) translated into the Englishe toung, by H. Billingsley, citizen of London. Whereunto are annexed certaine scholies, annotations, and inuentions, of the best mathematiciens, both of time past, and in this our age. With a very fruitfull preface made by M. I. Dee, specifying the chiefe mathematicall scie[n]ces, what they are, and wherunto commodious: where, also, are disclosed certaine new secrets mathematicall and mechanicall, vntill these our daies, greatly missed Elements. London: John Daye; 1570.
139. Homer. Odyssee. dt. Voss 1781, Nachdruck 1881. Stuttgart: Cotta'sche Buchhandlung; ca. 8. Jhd v. Chr.
140. Koenderink J, Wijntjes M, van Doorn A. Zograscopic viewing. i-Perception. 2013;4:192–206.
141. Ritschel T, Templin K, Myszkowski K, Seidel H-P. Virtual passepapouts. International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. 2012;7 pages.
142. Ell JJ, Gresty MA. Unicocular Pulfrich phenomenon: an abnormality of visual perception. Br J Ophthalmol. 1982;66:610–3.
143. Grasnick A. 3D ohne 3D-Brille: Handbuch der Autostereoskopie [Internet]. Springer; 2016. <http://www.springer.com/de/book/9783642305092#aboutBook>.
144. Symons W. Improved movable devices for producing optical illusion changes. Patent, GB 5759. März 14, 1896.
145. Symons W. Improved movable devices for producing optical illusion changes (Transparencies). Patent, GB 21,480. Nov 20, 1897.
146. The motograph moving picture book. London: Bliss, Sands & Co.; 1898.
147. Berthier A. Images stéréoscopiques de grand format. In: Moigno FNM, Herausgeber. Le Cosmos: Revue des Sciences et de les leurs applications. Paris: Le Cosmos; 1896. S. 227–33.

148. Ives FE. Kromskop color photography. London: The Photochromoskop Syndicate; 1898.
149. Ives FE. A novel stereogram. J Franklin Inst. 1902;153:51–2.
150. Ives FE. Parallax Stereogram and Process of making same. Patent, US 725,567. 1903.
151. Estanave E-P. Relief à vision directe et images changeantes par plaque autostéréoscopique. Extrait des „Comptes rendus du Congrès des sociétés savantes“. Paris: Imprimerie Nationale; 1911.
152. Estanave E. Dispositif de stéréophotographie et de stéréoscopie à l'aide des réseaux. Patent, FR 392.871. 1906.
153. Estanave E-P. Le relief stéréoscopique en projection par les réseaux lignés. J Phys Théor Appl. 1908;7:878–80.
154. Timby K. 3D and animated lenticular photography: between Utopia and entertainment. Berlin: De Gruyter; 2015.
155. Gaumont L. Un laboratoire des premières fois [Internet]. Les collections de la Société Française de Photographie. 2012. <http://laboratoiredespremieresfois.tumblr.com/post/30879706814/eug%C3%A8ne-estanave-et-les-images-changeantes-relief>. Zugegriffen: 28. Aug. 2016.
156. Lippmann G. Épreuves réversibles donnant la sensation du relief. J Phys Théor Appl. 1908;7:821–5.
157. Scientific American, Herausgeber. Integral photography- a new discovery by professor Lippmann. Sci Am. 1911;164.
158. Fujifilm. FUJICHROME Velvia 50 | Fujifilm Deutschland [Internet]. Fujifilm. 2016. <https://www.fujifilm.eu/de/produkte/analoge-fotografie/p/fujichrome-velvia-50>. Zugegriffen: 10. Sept. 2016.
159. THORLABS. Holography plates and supplies [Internet]. https://www.thorlabs.com/new_grouppage9.cfm?objectgroup_id=6716. Zugegriffen: 9. Juni 2019.
160. Kellerbauer A. Farbbilder aus gefrorenem Licht. Interferentielle Fotografie. Phys Unserer Zeit. 2010;41:16–22.
161. Lavédrine B. Photographs of the past: process and preservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute; 2009.
162. Sokolov PP. Avtostereoskopiya i integral'naya fotografiya po pr. Lipmanu/Avramova E, Übersetzer. (Autostereoscopy and integral photography by professor Lippman's Method) Reetz D, Herausgeber [Internet], Z Ges Naturforsch. 1911. http://futurepicture.org/PDF/P_P_Sokolov_1911_Autostereoscopy_and_Integral_PhOTOGRAPHY_by_Professor_Lippmans_Method.pdf. Zugegriffen: 10. September 2016.
163. Ives HE. Optical properties of a lippmann lenticulated sheet. J Opt Soc Am. 1931;21:171.
164. Ives HE. Optical device. Patent, US 2,174,003. 1935.
165. Ng R, Levoy M, Brédif M, Duval G, Horowitz M, Hanrahan P. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. Computer Science Technical Report CSTR. 2005;2:1–11.
166. Winnek Coffey DF. Apparatus for making a composite stereograph. Patent, US 2,063,985. 1935.
167. Valius NA. Растворная оптика (Rasteroptik). Moskau: Allunionsinstitut für Fotokinotechnik (NIKFI); 1949.
168. De Montebello RL. Integral photography. Patent, US 3,503,315. 1966.
169. Dudnikov YA. Autostereoscopy and integral photography. Soviet J Opt Technol. 1970;37:422–3.
170. Dudnikov YA, Rozhkov BK. Растворные системы для получения объемных изображений (Rastersysteme für volumetrische Bilder) [Internet]. Maschinenbau, Niederlassung Leningrad. 1986. <https://books.google.de/books?id=Y02jxgEACAAJ>.
171. Dudley LP. Stereoscopy in the telecinema and in the future. British Kinematogr. 1951;18:172.

172. Technical notes, 3-D television. Radio, TV and recording technician-engineer. 1956;5:14–5.
173. du Hauron LAD. *Les Couleurs en Photographie – Solution du Probleme*. Paris: A. Marion; 1869.
174. Joly J. On a method of photography in natural colours. *Scientific Transactions of the Royal Dublin Society*. Dublin: Royal Dublin Society; 1898. 127–139°S.
175. Eder JM. *Geschichter der Photographie*. 4. Aufl. Halle: Wilhelm Knapp; 1932.
176. Ahiman. Von der zukünftigen Photographie. *Photographisches Archiv*. Düsseldorf: Liesegang; 1896. S. 249–51.
177. Berthon R. Verfahren zur Herstellung von mehrfarbig wiederzugebenden photographischen Bildern. Patent, DE 223,236. 1908.
178. Ede F. Un épisode de l'histoire de la couleur au cinéma: le procédé Keller-Dorian et les films lenticulaires. 1895. 2013;187–202.
179. Gretener E. A brief survey of the physics and technology of the berthon-siemens color process. *J Soc Motion Pict Eng*. 1937;28:447–63.
180. Hess W. Unmittelbar wirkendes Stereobild. Patent, CH 61475. Mai 30, 1912.
181. Lorenz D. 3-D-Linsenrasterbilder, eine Erfindung aus der Schweiz. *Arbeitskreis Bild Druck Papier*. Münster: Waxmann; 2004. S 20–7.
182. Kanolt CW. Production of stereoscopic pictures. Patent, US 1,882,648. Juni 18, 1930.
183. Kanolt CW. Projection of pictures for viewing in stereoscopic relief. Patent, US 2,075,853. 1937.
184. Ives HE. Projection of stereoscopic pictures. Patent, US 1,883,290. 1932.
185. Ives HE. Making stereoscopic parallax panoramagrams from pseudoscopic parallax panoramagrams. Patent, US 1,905,716. 1933.
186. Eggert J, Heymer G. Verfahren zur Herstellung von Filmen mit linearen lichtbrechenden Elementen. Patent, DE 558,365. 1932.
187. Kanolt CW. Photographic method and apparatus. Patent, US 1,260,682. 1915.
188. Buckley OE, Darrow KK. Herbert Eugene Ives 1882–1953 [Internet]. National Academy of Sciences. 1956. <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/ives-herbert.pdf>.
189. Ives HE. Parallax panoramagrams made with a large diameter lens. *J Opt Soc Am*. 1930;20:332.
190. Noaillon EHV. Art of making cinematographic projection. Patent, US 1,772,782. 1928.
191. Jennings WW, Vanet P. New direct-vision stereo-projection screen. *J Soc Motion Pict Eng*. 1952;59:22–7.
192. Kaplan SH. Theory of parallax barriers. *J Soc Motion Pict Telev Eng*. 1952;59:11–21.
193. Blundell BG. On aspects of glasses-free 3D cinema ~70 years ago. Auckland University of Technology. 2013.
194. Ivanov BT. *Stereoskopicheskoye Kino (Stereoskopisches Kino)*. Moskau: Goskinoisdat; 1951.
195. Ivanov SP. Russia's third dimensional movies. *American Cinematographer*. 1941;22(5):212–3.
196. artechock film. FILMINFO: Konzert: Das Land der Jugend (Konzert: Semlja Molodostii) [Internet]. 2013. <http://www.artechock.de/film/text/filminfo/k/ko/kodala.htm>. Zugegriffen: 3. Sept. 2016.
197. Gabor D. Three-dimensional cinema. *The New Scientist*. 1960;141–5.
198. Winnek Coffey DF. Apparatus for projecting pictures in relief. Patent, US 2,100,634. 1931.
199. Winnek Coffey DF. Composite stereography. Patent, US 3,409,351. 1968.
200. Colbert J-B. *Lettres, Instructiones et Mémoires de Colbert*. Clément P, Magne P, Herausgeber. Paris: Imprimerie Impériale; 1861.
201. Algoud H. *Grammaire des Arts de la Soie*. Paris: Jean Schemit; 1912.
202. Bergmann J. *Handbuch der Appretur*. Marschik C, Herausgeber. Berlin: Julius Springer; 1928.

203. Amidror I. The theory of the moiré phenomenon. Bd. 1: Periodic layers. 2. Aufl. London: Springer; 2009.
204. Lipton L, Feldman MH. New autostereoscopic display technology: the SynthaGram. In: Proc. SPIE 4660 Woods AJ, Merritt JO, Benton SA, Bolas MT, Herausgeber. 2002. S. 229–35.
205. van Berkel C. Image preparation for 3D LCD. In: Proc. SPIE 3639 Merritt JO, Bolas MT, Fis-her SS, Herausgeber. 1999. S. 84–91.
206. Grasnick A. Autostereoskopische Anzeigevorrichtung. Patentanmeldung, EP 1 895 782. 2007.
207. Zippel T. Jenaer zeigt Weltpremiere auf Cebit – Räumliches Bilderlebnis ohne Brille mög-lich. Thüringer Allgemeine [Internet]. Onlineversion. Erfurt; 24. Februar 2010. <https://www.thueringer-allgemeine.de/wirtschaft/jenaer-zeigt-weltpremiere-auf-cebit-raeumliches-bilderlebnis-ohne-brille-moeglich-id225967659.html>. Zugegriffen: 27. Okt. 2019.
208. Nakayama E, Hamagishi G, Yamashita A, Mashitani K, Sakata M, Furuta Y, et al. Two-dimensional/three-dimensional compatible type image display. Patent, US 5,831,765. Nov, 1998.
209. Holmes R. E. 3-D TV without glasses. Proceedings of the IEEE 1991 National Aerospace and Electronics Conference NAECON 1991. Dayton, OH, USA: IEEE; 1991. S. 914–20.
210. Sombrowsky R. Verfahren zur Erzeugung stereoskopischer Darstellungen. Patent, EP 0 584 752 B1. 1993.
211. Eichenlaub JB. Autostereoscopic display with illuminating lines and light valve. Patent, US 4,717,949. 1988.
212. Jacobs A, Mather J, Winlow R, Montgomery D, Jones G, Willis M, et al. 2D/3D Switchable displays. Sharp Technical J. 2003;4.
213. Rassweiler A. Nintendo 3DS Carries \$100.71 Bill of Materials, IHS iSuppli Physical Tear-down Reveals – IHS Technology [Internet]. 2011. <https://technology.ihs.com/389045/nintendo-3ds-carries-10071-bill-of-materials-ihs-isuppli-physical-teardown-reveals>. Zugegriffen: 4. Sept. 2016.
214. Oyagi Y. Storage medium storing display, controlling program, display controlling apparatus, display controlling method and display controlling system. Patent, US 8,599,246. 2013.
215. Sharp. 4-Color Innovation, Quattron Technology | TVs AQUOS Global Website [Internet]. 2010. http://www.sharp-world.com/aquos/en/product/4_color_innovation.html. Zugegriffen: 9. Sept. 2016.
216. Asano Y, Fairchild MD, Blondé L. Observer variability experiment using a four-primary dis-play and its relationship with physiological factors. 21st Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. Albuquerque, New Mexico, USA: Society for Imaging Science and Technology; 2013.
217. Cheng H-C, Ben-David I, Wu S-T. Five-primary-color LCDs. J Disp Technol. 2010;6:3–7.
218. Yang Y-C, Song K, Rho S, Rho N-S, Hong S, Deul KB, et al. Development of six primary-color LCD. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2005;36:1210.
219. Grasnick A, Relke I. Verfahren und Anordnung zur räumlichen Darstellung. Apr, 2002.
220. Mashitani K, Hamagishi G, Higashino M, Ando T, Takemoto S. Step barrier system multi-view glassless 3D display. In: Proc. SPIE 5291 Woods AJ, Merritt JO, Benton SA, Bolas MT, Herausgeber. 2004. S. 265–72.
221. Mashitani K, Takahashi H, Aida T. Multi-view glass-less 3-d display by parallax barrier of step structure. Memoirs- Faculty of Engineering, Osaka City University. 2007;48:1–8.
222. Schmidt A, Grasnick A. Multiviewpoint autostereoscopic displays from 4D-Vision GmbH. In: Proc. SPIE 4660 Woods AJ, Merritt JO, Benton SA, Bolas MT, Herausgeber. 2002. S. 212–21.
223. Magnus E. Ueber Einrichtung und Beleuchtung von Räumen zur Aufstellung von Gemälden und Sculpturen. Erbkam G, Herausgeber. Z Bauwesen. 1864;14:202–20.
224. Lambert JH. Lambert's Photometrie (Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colo-rum et umbrae). (1760). Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1892.

225. Wiener C. Lehrbuch der darstellenden Geometrie. Leipzig: B. G. Teubner; 1884.
226. Mehmke R. Über die mathematische Bestimmung der Helligkeit in Räumen mit Tagesbeleuchtung, insbesondere Gemäldeälen mit Deckenlicht. *Z Math Phys*. 1898;43:41–57.
227. Gershun AA. Izbrannyye trudy po fotometrii i svetotekhnike (Ausgewählte Arbeiten zur Photometrie und Lichttechnik). Moskau: Verlag für Physik und Mathematik; 1958.
228. Gershun AA. Svetovoye Pole (Lichtfeld). Leningrad: ONTI. Edition allgemeine Technik; 1936.
229. Gershun A. The light field. *J Math Phys*. 1939;18:51–151.
230. Moon P, Eberle Spencer D. Theory of the photic field. *J Franklin Inst*. 1953;255:33–50.
231. Adelson EH, Bergen JR. The plenoptic function and the elements of early vision. In: Landy MS, Movshon JA, Herausgeber. Computational models of visual processing. Cambridge: MIT Press; 1991. S. 3–20.
232. Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering. ACM Press; 1996. S. 31–42. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=237170.237199>. Zugegriffen: 10. Juli 2016.
233. Levoy M. Light fields and computational imaging. *Computer*. 2006;39:46–55.
234. Wilburn B, Joshi N, Vaish V, Talvala E-V, Antunez E, Barth A, et al. High performance imaging using large camera arrays. ACM SIGGRAPH 2005 Papers on – SIGGRAPH '05. Los Angeles, California: ACM Press; 2005. S. 765.
235. Wilburn B. High performance imaging using arrays of inexpensive cameras. Stanford: Stanford University; 2005.
236. Lippmann G. Épreuves réversibles. Photographies intégrales. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Paris: Gauthier-Villars; 1908. S. 446–51.
237. da Vinci L. Traktat von der Malerei. Herzfeld M, Herausgeber (Ludwig, H. Übersetzer). Jena: Eugen Diederichs; 1909.
238. Wheatstone C. Contributions to the Physiology of Vision. No. 1. *J R Inst G B*. 1830;1:101–17.
239. Faraday M. On the magnetization of light, and the illumination of magnetic lines of force. *Philos Mag Ser*. 1845;3(28):294–317.
240. Faraday M. Thoughts on ray-vibrations. *Philos Mag Ser*. 1846;3(28):345–50.
241. Faraday M. On new magnetic actions, and on the magnetic condition of all matter. *Philos Mag Ser*. 1845;3(28):396–405.
242. Kim Y, Hong K, Lee B. Recent researches based on integral imaging display method. *3D Res*. 2010;1:17–27.
243. Hong J, Kim Y, Choi H-J, Hahn J, Park J-H, Kim H, et al. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues [Invited]. *Appl Opt*. 2011;50:H87.
244. Arai J, Okano F, Kawakita M, Okui M, Haino Y, Yoshimura M, et al. Integral three-dimensional television using a 33-megapixel imaging system. *J Display Technol*. 2010;6:422–30.
245. Hong J, Kim Y, Park S, Hong J-H, Min S-W, Lee S-D, et al. 3D/2D convertible projection-type integral imaging using concave half mirror array. *Opt Express*. 2010;18:20628.
246. Takaki Y. Development of super multi-view displays. *ITE Trans Media Technol Appl*. 2014;2:8–14.
247. Grasnick A. Concept of an autostereoscopic system containing 29 million of stereoscopic image pairs. In: Tian A, Asundi A, Liu W, Zhang C, Herausgeber. Xi'an, China: SPIE; 2015.
248. Grasnick A. Creating of autostereoscopic displays with random lenticulars by hyperview approach. *DGaO Proceedings 2016*. Erlangen: Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik e. V.; 2016.
249. Grasnick A. Super resolution from hyperview image stack by spatial multiplexing. *3D Res*. 2016;7:1–6.



Virtuelle Räume

5

Die Erschaffung von Scheinwelten

Zusammenfassung

Für eine wirklich virtuelle Impression ist es nicht ausreichend, in einen kleinen Guckkasten zu blicken oder auf einen Bildschirm zu starren. Der fesselnde Eindruck einer virtuellen Erzählung im Weinbaumschen Sinne ist so nicht zu erreichen und von der Lemschen Phantomatik ist man beliebig weit entfernt. Es scheint also geboten, noch weitere Sinne zu reizen. Das Publikum erweitert seinen Handlungsspielraum und wird vom reinen Voyeur zum Akteur. Der Stuhl, auf dem ein Betrachter sitzt, wird zum Motorrad, Auto oder gar zum Flugzeug. Wind umspielt den Piloten des virtuellen Flugzeugs, man riecht den Geruch von Auspuffgasen und hält anstelle einer Computermaus einen Steuerknüppel in der Hand. Die Interaktion mit der virtuellen Welt bedingt die Kenntnis der Blickrichtung des Interakteurs. Dazu werden geeignete Sensoren an unterschiedlichen Stellen des Körpers angebracht, mit denen sich nun die Stellung der Hände, der Finger, der Beine oder des Kopfes bestimmen lässt. Der Wunsch, die virtuelle Welt zu realisieren, lässt die Menschen seit Ovids Zeiten von der Materialisierung der Gedanken träumen. Mit Pygmalions Belebung seiner geliebten Galatea gibt es dafür auch ein scheinbares Zeugnis. Ideen lassen sich heute in reale Dinge umsetzen, wenn man dazu einen 3D-Drucker verwendet. Noch ist nicht möglich, virtuelle Objekte wie auf dem Holodeck des Raumschiffs Enterprise tatsächlich auch real entstehen zu lassen. Aber, wer weiß...?

5.1 Panoramen

Mittendrin statt nur davor

Wie es scheint, benötigt man für eine 3D-Darstellung immer einen Monitor oder eine Leinwand. Will man darauf verzichten, wird man ein Stereoskop benutzen müssen. Der Eindruck, sich dabei in einer fremden Welt zu befinden, wird sich sicherlich schnell verflüchtigen.

Der Wunsch nach einer stärkeren Einbindung des Zuschauers in die künstliche Illusion war immer existent. Eine naheliegende Idee ist die großformatige Darstellung von Szenen in Form eines Panoramas.

La Nature a Coup d'Œil – Die Natur auf einen Blick

Die Idee, die einen umgebende Welt vollständig abzubilden, ist nicht neu. Bereits im 12. Jahrhundert hatte der chinesische Maler Zhang Zeduan das Leben in der Stadt Kaifeng auf einer über fünf Meter langen Seiden-Rolle dargestellt¹. Vielleicht ist das Abrollen eines langen Bildes für sich selbst genommen schon Entertainment genug. Beeindruckender ist es aber sicherlich, wenn ein solches Bildnis auch aufgestellt wird. Ein Panorama mit einer Länge von mehreren Metern kann dann deutlich intensiver und realistischer auf den Betrachter wirken als ein kleines Bild.

Großformatig montierte Panoramen waren seit dem späten 18. Jahrhundert bekannt und beliebt. Als Schöpfer des Wortes „Panorama“ gilt der irische Male Robert Barker, der im Jahre 1787 darauf ein Patent anmeldete (aus S. 165):

„....für seine Erfindung eines ganz neuen Geräts, das von ihm La Nature a Coup d'Naturel genannt wird, zum Zweck der Darstellung von Ansichten der Natur in ihrer Gesamtheit durch Ölgemälde, Fresken, Aquarelle, Buntstifte...“

Barker hatte festgelegt, dass diese Darstellungen der Natur in einem runden Raum oder Rahmen befestigt werden und der Betrachter zu dem Bild immer einen gewissen Abstand haben muss, damit die gewünschte Wirkung entfaltet wird.

Der Begriff „Panorama“² findet sich zwar noch nicht in Barkers Anmeldung von 1787, wohl aber in der Veröffentlichung von 1796. Dort steht zur Erklärung des französischen Begriffs „La Nature a Coup d'Œil“ die englische Erläuterung „This invention has been since called the Panorama“ (aus [2], S. 165). Barker hatte seine Panoramen in Rotunden (Gebäuden mit kreisförmigem Grundriss) montiert und diese der Öffentlichkeit gegen Geld präsentiert. Das „Waterloo-Panorama“ brachte es immerhin auf Einnahmen von 10.000 Pfund bei nur einem Schilling Eintritt (1/20 Pfund) [3].

Der Panoramamaler Daguerre erschuf mit seinem Kollegen Bouton in Paris ein Diorama³, das die Realität der Szene noch erhöhte. Es war derjenige Daguerre, der später mit der Daguerreotypie einen Vorläufer der modernen Fotografie etablieren und damit einen noch größeren Realismus erzielen sollte.

¹Die Qingming-Rolle befindet sich heute im Palast Museum in Peking [1].

²Aus griech. pan = all- + horama = Sicht.

³Aus griech. dia = hindurch + horama = Sicht.

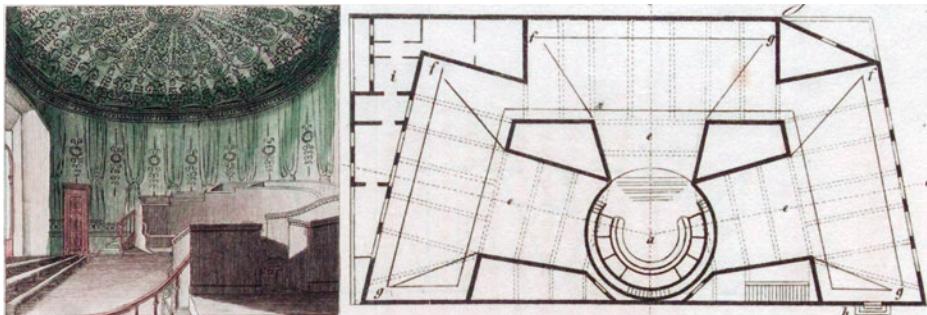


Abb. 5.1 Pariser Diorama mit drehbarem Zuschauerraum, Friedrich Justin Bertuch (1830) aus [8] Melanges. CCCXXXIX

Zunächst bemalte Daguerre aber eine möglichst große Leinwand beidseitig und beleuchtete die Leinwand je nach gewünschtem Effekt von vorn, von hinten oder nur in bestimmten Bereichen ([4] ab S. 61). Dadurch waren trotz eines einzigen großen Bildes auch Variationen der Szenerie möglich. Daguerre beschreibt das so (aus [4] ab S. 60):

„Bei allen diesen Gemälden ist ein Wechsel von Tag- und Nachtbeleuchtung ausgeführt, womit noch das Verschwinden von Figuren verbunden ist, wodurch z. B. in der Messe um Mitternacht menschliche Figuren an der Stelle zum Vorschein kommen, wo zuvor Kirchenstühle zu sehen waren...“

Diese veränderlichen Gemälde wurden ab 1822 in Paris [5], ab 1823 [6] in London und ab 1827 in Berlin [7]⁴ in eigenen Gebäuden aufgebaut und überaus großformatig⁵. Die Dioramen waren als Theater aufgebaut und die Vorführungen jeweils sorgfältig inszeniert. Die Aufführungen waren dabei nicht auf eine einzelne Leinwand begrenzt. Ein Blick in das Auditorium verrät die „theatralische“ Absicht (Abb. 5.1 links). Der Saal hatte einen Durchmesser von 35 Fuß⁶ und bot darin 250 Personen Platz (nach [8] CCCXXXIX). Nach etwa einer viertel Stunde dreht sich der gesamte Saal, wodurch dem Zuschauer der Blick auf eine der anderen großen Leinwände⁷ freigegeben wurde. In Abb. 5.1 rechts ist der Grundriss des Pariser Dioramas abgebildet. Die drei Leinwände sind dort jeweils als die Strecken **f-g** dargestellt, der drehbare Zuschauerraum ist der Kreis in der Mitte (mit **a** gekennzeichnet).

Dioramen waren üblicherweise groß, ortsfest und für heimische Anwendungen oder zum Herumzeigen völlig ungeeignet. Daher wurde diese Technik auch in kleine Schachtel verpackt und als Spielzeug oder Andenken nach dem Besuch eines Dioramas verkauft.

⁴Erbaut und betrieben von den Brüdern Carl, Ferdinand und Georg Gropius ([7], S. 147).

⁵Im Berliner Diorama nahmen die Gemälde eine Fläche von 2500 Quadratfuß ein (ebenda).

⁶Nach dem Weimarer Maß (1 Fuß = 28,2 cm) etwa 10 m.

⁷65 × 42 Fuß, also etwa 18 × 12 m.

In den 20er Jahren des 19. Jahrhunderts wurden in Großbritannien einige Dioramen aufgebaut⁸ und so nimmt es nicht Wunder, dass mit steigendem Bekanntheitsgrad der Technik auch entsprechende Souvenirs und Guckkästen auftauchten. Der Londoner Verleger William Spooner hatte eine Art von Verwandlungsbildern im Angebot, die er „Protean Views“⁹ nannte, zeitgleich mit den „Dioramic Views“¹⁰ des Londoner Verlegers William Morgan ([9], S. 76). Diese Bilder waren wie die großen Dioramen beidseitig bemalt oder bedruckt. Bei normaler Beleuchtung sah man eine gewöhnliche Szene, wie z. B. einen Blick auf eine Landschaft. Hielt man das Bild dann gegen ein helles Licht, wurde das rückwärtige Bild sichtbar und man sah hier z. B. plötzlich einen Vulkan ausbrechen.

Der Franzose Lefort baute einen kleinen Kasten für die Bilder, den er „Polyorama panoptique“ nannte und für den er 1849 ein Patent erhielt ([9], S. 78). Man schaute durch ein Okular auf das Diorama, das über zwei Klappen von oben oder hinten beleuchtet werden konnte. Beide Klappen waren über eine Mechanik miteinander verbunden. Schloss man also eine Klappe, öffnete sich dafür die andere. Damit war immer nur ein Effekt von zwei darstellbaren sichtbar.

Dem Glasmaler Seguin war das nicht genug. Seguin sah das Polyorama als „zauberhaftes“ Instrument an und es verlangte ihn nach Bewegung (aus [10], S. 237)¹¹:

„Das „polyorama animé“ ist ein optisches Instrument des Genres „Fantasmagorie“. Der Effekt, den dieses Instrument erzeugt, besteht darin, in malerischen Ansichten die Bewegungen der Natur zu imitieren: wie die Bewegungen von Wasser, Flammen, Wolken, Dampf und animierten Personen...“

Durch Verschieben einer Metallblende werden mehrere Bilder nacheinander an der gleichen Position auf einem Schirm projiziert. Grundsätzlich konnten schon mehrere Bilder nacheinander dargestellt werden, sodass ein Eindruck von natürlicher Bewegung entstehen konnte¹².

Seguin arbeitete auch für den Laternen-Magier Robin¹³, der ihn auf die Idee des Polyoskops¹⁴ brachte ([13], S. 95). Ein Polyoskop ist im Prinzip eine verkleinerte Version der Pepper-Ghost-Illusion (s. Beschreibung aus [14], S. 22):

⁸z. B. in London, Liverpool, Manchester, Dublin und Edinburgh [6].

⁹Nach dem Meeresgott Proteus aus der griechischen Mythologie, Proteus konnte verschiedene Gestalten annehmen und ist als legendärer Verwandlungskünstler auch für „Proteus‘ Perspektiven“ namengebend, auch als „Spooner’s perspective views“ bekannt.

¹⁰Auch als „Improved Protean“ oder „Transformations“ vermarktet.

¹¹Eigene Übersetzung.

¹²Die Pariser Drogerie Menier & Cie listet in ihrem Katalog von 1854 auch ein Polyorama animé mit 12 Bildtafeln ([11], S. 216).

¹³Der Magier Henri Robin stellte zur gleichen Zeit wie Pepper in London (1963) seine „lebenden Geister“ vor (s. [10], S. 236).

¹⁴Wofür Séguin auch ein Patent anmeldete (s. [12], S. 112).

„Im Séguin-Polyoskop befindet sich ein 45-Grad-Spiegel. Er dient dazu, Bilder in die Augen des ‚Voyeurs‘ zu reflektieren und einen Wechsel zwischen den Tableaus hervorzurufen. Diese, die sich in der Schachtel befinden, ‚verwandeln sich ineinander und scheinen miteinander zu verschmelzen‘.“

Obgleich nun mit Polyoskop und Polyorama animé durchaus interessante Möglichkeiten zur Verfügung standen, um die Illusion von Bildwechsel oder gar Bewegung zu erzeugen, setzten Seguins Ideen sich nicht durch. Der Wunsch nach einem durch Bewegung verstärktem Realismus blieb aber bestehen.

Der Architekt Langhans griff einen Vorschlag des Hoftheatermalers Gropius auf, der durch seine eigenen Panoramen und Dioramen inspiriert eine Wasserfahrt realistisch imitieren wollte (s. [15], S. 548). Langhans erfand dafür das Pleorama¹⁵ und schaffte damit eine künstliche Realität (aus [16], Vorwort):

„Der Schaulustige wird in eine Barke steigen und, wenn die Ausführung irgend gelungen ist, ein wirkliches wogendes Meer zu befahren, wirkliche Inseln und Vorgebirge zu umfahren träumen können, auch jedes Mal, wenn er bei erneuerten Besuchen einen verschiedenen Sitz wählt, wie in der Natur selbst, ganz verschiedene Aussichten genießen.“

Die Leinwände wurden am Zuschauer vorbeibewegt, sodass sich dadurch der Eindruck von Bewegung einstellte.

Mit dem Siegeszug des Kinos war die Blütezeit der großformatigen stehenden Bilder beendet und die Wirkung der Leinwände von Pano- und Pleoramen wurde durch das Bewegtbild auf der Leinwand der Kinos ersetzt.

Aber auch hier wollte man mehr Realismus. Dazu hatte der Amerikaner Waller hatte eine im wahren Wortsinne „große“ Idee. Waller wollte mit der Erfindung seines „Vitarama“ vor allem eines (aus [17]): „...den Effekt oder die Illusion zu erzeugen, dass sich der Zuschauer tatsächlich in der dargestellten Umgebung befindet und von dieser umgeben ist.“

In Wallers Vitarama-Kino wurden mit mehreren Projektoren¹⁶ auf eine gekrümmte Leinwand projiziert. Die Leinwand konnte dabei den Zuschauer vollständig umgeben (360° Projektion) und auch in vertikaler Richtung gekrümmmt sein („vom Horizont bis zum Zenit“). Für einen sitzenden Zuschauer wurde aufgrund des Gesichtsfeldes des Menschen 180° für ausreichend gehalten¹⁷ und so eine Viertel-Hohlkugel (quasi eine Semi-Hemisphäre) als geeignete Projektionsleinwand angesehen. Öffentliche Aufführungen von Projektionen mit zehn Projektoren wurden von Waller auf der Weltausstellung 1939

¹⁵Aus griech. pleo = schiffen- + horama = Sicht.

¹⁶In Wallers und Walkers Patent von 1937 [17] waren vier Projektoren illustriert, wobei auch beschrieben wird, dass es durchaus mehr oder weniger sein können.

¹⁷Obgleich das horizontale Gesichtsfeld des Menschen tatsächlich beinahe 220° umfasst und durch Drehung der Augen und des Kopfes vollständig auf 360° ausgedehnt werden kann, wie Hueck schon 1840 mitteilte ([18], S. 84).

im Inneren der „Perisphere“, einer riesigen Kugel mit mehr als 50 m Durchmesser, aufgeführt¹⁸.

Mit dem Ausbruch des Krieges erkannte man das Potenzial des Vitarama-Kinos für die Ausbildung von Bomberschützen. Diese saßen für die Ausbildung inmitten eines Vitaramas hinter ihrer Waffe in einem Geschützturm und feuerten auf anfliegende Flugzeuge. Alles war dabei real – bis auf die Flugzeuge. Da dieses „Schießkino“ („Gunnery Training“ [17]) zusätzlich mit 3D-Sound ausgestattet war, konnte ein sehr realistischer Luftkampf auch ohne Gefahr für den Schützen trainiert werden. In einem Artikel über Waller beschreibt der Interviewer die Reaktion des Luftschauspieler recht plastisch: „...er dreht und schießt und es ist kein Spiel mehr – der Schweiß ist echter Schweiß, die Angst ist echte Angst.“ (aus [20]). Als Lohn für Schweiß und Angst hatte man den entscheidenden Vorteil, außerhalb jeglicher Gefahr zu sein.

Auch auf dem „Chicago Railroad Fairground“ war 1949 ein Vitarama-Kino aufgebaut. Darin wurde ein Panorama-Video von den Niagarafällen gezeigt [21]. Um die Leinwand auszufüllen, wurden dazu nicht weniger als zehn synchronisierte Projektoren benötigt. Das war ein wenig aufwendig, um für eine Vielzahl von Kinos praktikabel zu sein. Also reduzierte Waller die Anzahl der Projektoren auf drei, richtete 1952 im Broadway Theater New York damit einen Kinosaal aus und erfand für das ganze System den klangvollen Namen „CINERAMA“ [22]. Obgleich das CINERAMA, eine Kombination aus „Cinema“ und „Panorama“, eine beeindruckende Technologie war, blieb die Installation und der Betrieb mehrerer synchronisierter Projektoren nicht einfach. Zudem war es schwierig, die drei Teile des Bildes verzerrungsfrei und passgenau übereinanderzulegen. Dadurch konnten die Kanten der Einzelbilder sichtbar sein und so den imposanten Gesamteindruck zerstören. Waller selbst hatte schon 1944 die Idee zu einem Scanning-Projektor, bei dem bestimmte Filmabschnitte nacheinander auf die Leinwand projiziert wurden [23]. Es dauerte dann noch fast zwei Jahrzehnte, bis 1963 der erste CINERAMA-Film¹⁹ mit einem einzigen Projektor aufgeführt wurde.

Die Idee, eine Großprojektion mit einer geringeren Anzahl von Projektoren auszustatten, war die Basis für die Gründung der IMAX Corporation. Direkt nach der Weltausstellung 1967 in Montreal taten sich vier Kanadier mit der Idee zusammen, eine Panoramaprojektion mit nur einem einzigen Projektor zu realisieren. Die CINERAMA-Kinos sind weitestgehend verschwunden, die IMAX-Kinos sind dagegen in großer Zahl vertreten und besonders mit der Aufführung von 3D-Filmen (IMAX 3D) inklusiver Raumklang (IMAX Sound) erfolgreich. IMAX gilt heute faktisch als der „Gold-Standard“ des Kinos.

¹⁸Waller war dort verantwortlich für die „Living Murals“ (die lebenden Wandbilder), einem Film von nur 83 Sekunden Länge von Eastman Kodak, der auf den Himmel der Perisphere projiziert wurde [19].

¹⁹Die erfolgreiche Komödie „It's A Mad, Mad, Mad World“.



Abb. 5.2 Le Piloteur, La Section de Cinématographie Technique de la Direction des Inventions (1919) aus [29], mit freundlicher Genehmigung von CNRS Images

Die Lehrschaukel der Flieger

Es ist sicherlich angemessen, Wallers Schießkino als Simulator zu bezeichnen. Dabei waren Flugsimulatoren in 30er Jahren des 20. Jahrhunderts keineswegs etwas grundlegend Neues.

Der „Link Trainer“ von Ed Link war zu dieser Zeit bekannt und bei den Luftstreitkräften und Airlines in verschiedenen Ländern im Einsatz (s. [24], Kap. 2)

Die Pilotenausbildung war der ursprüngliche Zweck der Flugsimulatoren. Schon mit dem Beginn der militärischen Luftfahrt im 1. Weltkrieg stieg die Notwendigkeit, Piloten für das neue Kampfsystem auszubilden. Um dies effektiv zu tun, wurden bei den Kriegsteilnehmern auch bodengestützte und nicht flugfähige Flugzeugnachbildungen aufgebaut. Man kann diese Konstruktionen, so einfach sie auch gewesen sein mögen, durchaus als Vorläufer der heutigen Flugsimulatoren ansehen. Überliefert sind zum Beispiel die britische „Rocking Nacelle“²⁰ des Majors Hawker, die deutsche „Lehrschaukel“ des Ingenieurs Drexel [26] (damals aufgestellt auf dem Flugplatz Döberitz, s. [27], S. 52) und der französische „Piloteur“ von Leutnant Maurice Lender

²⁰Schaukelgondel, auch „rocking fuselage“ (Schaukelrumpf) [25], S. 151.

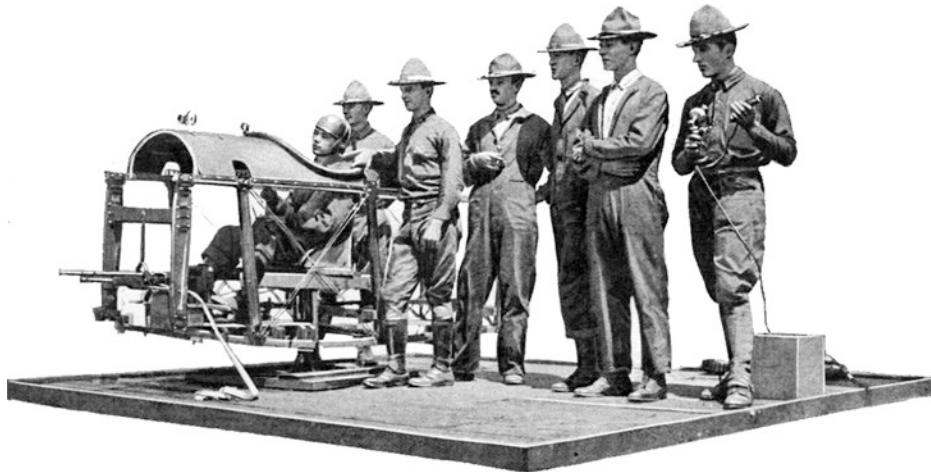


Abb. 5.3 “Dry Shooting” for Airplane Gunners, Captain E. C. Crossman (1919) aus [30], S. 13

und Paul Heidelberg [28]. Von dem französischen „Piloteur“ existiert sogar noch ein Film, auf dem die beiden Soldaten den Simulator in voller Funktion und mit erstaunlich schneller Bewegung zeigen. Ein Standbild daraus ist in Abb. 5.2 abgedruckt.

Natürlich hatten auch die Amerikaner mit dem „Dry Shooter“ ein solches Gerät im Angebot, mit dem der Maschinegewehrschütze seine Zielübungen auch am Boden durchführen konnte (s. Abb. 5.3)

5.2 Duplizierte Realität

Kopierte Welten für alle Sinne

Die Flugsimulatoren und Schießtrainer nutzten die Stimulation des Bewegungs- und Gesichtssinns, um realistische Eindrücke zu erschaffen. Die Stimulation weiterer Sinne kann den Raumeindruck verstärken und die Empfindung erwecken, sich eigentlich an einem anderen, weit entfernten Ort zu befinden.

Der amerikanische Filmkünstler und Kameramann Heilig war zu Beginn der 1950er Jahre durch die damaligen farbigen 3D-Filme, den Raumklang und eben auch durch das neuartige CINERAMA-Kino inspiriert, diese unterschiedlichen „Sinnesmaterialien“ zu einem Werk zu kombinieren [31]. Er glaubte, dass die Bewegung eines Menschen seinem anderen Sinnen in Wahrnehmung unterlegen ist und formulierte daraus vier „Gesetze“ der cineastischen Kunst:

1. „Das Wesen der menschlichen Kunst wurzelt grundsätzlich auf dessen besonderem psychischen Apparat und ist durch die ihm zur Verfügung stehenden materiellen Mittel begrenzt.“²¹
2. „Bewusstsein ist eine Kombination aller Sinneseindrücke, die das Gehirn durch den sensorischen Teil des Nervensystems erhält, der in die Empfangsorgane – Augen, Ohren, Nase, Mund und Haut – unterteilt werden kann.“²²
3. „Das menschliche Gehirn wechselt schnell von Element zu Element und von Sinn zu Sinn in einem ungefähren Verhältnis von Sehen 70 %, Hören 20 %, Geruch 5 %, Berührung 4 %; und Geschmack 1 %, wobei jeweils ein Eindruck entsprechend den Bedürfnissen der individuellen und ethnischen Entwicklung ausgewählt wird.“²³
4. „Der menschliche Schaffensprozess wird durch äußere Eindrücke dominiert. Der Mensch lernt die Geheimnisse ihrer Grundprinzipien durch Nachahmung und gestaltet diese dann nach seinen eigenen Wünschen. Das geht von der Wahrnehmung über die Nachahmung bis zur Schöpfung, d. H. von der Darstellung der äußeren bis zur Darstellung der inneren Welt.“²⁴

Es ist vielleicht etwas gewagt, hier von Gesetzen zu sprechen, vielmehr handelt es sich um Statements. Die ersten beiden Aussagen sind unmittelbar klar und bedürfen eigentlich keiner Erläuterung. Die Ausdruckskraft ist ohne Zweifel abhängig von den Sinnen, der Wahrnehmung und der Fantasie. Etwas schwieriger ist die dritte Aussage. Die klassischen 5 Sinne im Sinne des Aristoteles liefern zur Wahrnehmung unterschiedlich hohe Beiträge. Die Einteilung in qualitative Anteile ist insofern richtig, da das Sehen unumstritten den größten Anteil an der Wahrnehmung hat. Das Sehen wurde in allen Epochen weitestgehend als wichtigster Sinn angesehen, zumeist gefolgt vom Hören und Geschmack (s. a. „Geschichte der Sinne“ [33]).

Aristoteles hatte das Empfindungsvermögen in fünf Kategorien eingeteilt: Das Sichtbare, das Hörbare, das Riechbare, das Schmeckbare und schließlich das Fühlbare. Jeder Sinn ist dabei ganz eigentümlich nur für bestimmte Empfindungen empfänglich. Das

²¹Im Original: „The nature of man's art is fundamentally rooted in his peculiar psychic apparatus and is limited by the material means at his disposal“ (aus [32], S. 244).

²²Im Original: „Consciousness is a composite of all the sense impressions conveyed to the brain by the sensory part of the nervous system which can be divided into the great receiving organs – the eyes, ears, nose, mouth, and skin.“ (ebenda S. 245).

²³Im Original: „The brain of man shifts rapidly from element to element within each sense and from sense to sense in the approximate proportion of sight, 70 %; hearing, 20 %; smell, 5 %; touch, 4 %; and taste, 1 %, selecting one impression at a time according to the needs of individual and racial development.“ (ebenda S. 248).

²⁴Im Original: „In his creative process, man is imposed on by outer impressions. He learns the secrets of their basic principles through imitation and then subjects these to the needs of his own expression. He goes from reception to imitation to creation, i.e., from portraying the outer to portraying the inner world.“ (ebenda S. 251).

Gesicht nur für die Farben und das Licht, das Gehör für den Schall der Töne und der Stimme, der Geruch für die riechbaren Teilchen, der Geschmack für die Bewertung der Nahrung und das Gefühl für die Beschaffenheit der Dinge (warm und kalt, trocken und feucht, weich und hart) und auch für das Übermäßige [34]. Die Zahl fünf ist ebenso wie die Zahl vier²⁵ seit der Antike von symbolischer Bedeutung und damit regelstiftend. Bis in die Neuzeit waren die fünf Sinne ausreichend zur Beschreibung der Wahrnehmung.

Der 6. Sinn

In der Mitte des 18. Jahrhunderts endeten die Hexenverfolgungen und damit eigentlich auch der offizielle Glaube an Zauberei und Geister. Tatsächlich war aber dieses Ende auch der Beginn einer quasi-wissenschaftlichen Beschäftigung mit übersinnlichen, also über die 5 Sinne hinausgehende, Erscheinungen. Eine der ersten neuzeitlichen Erzählungen über telepathische Wahrnehmungen ist die des schwedischen Mystikers Swedenborg, den angeblich die Vision eines Brandes in Stockholm zur gleichen Zeit im hunderte Kilometer entfernten Göteborg heimsuchte.

Der Philosoph Kant untersuchte die Geschichte in der Abhandlung „Träume eines Geistes-
sehers“ [35]. Er beginnt seine Kritik damit, dass sich Swedenborgs (den Kant Swedenberg nennt) gesamte Beschäftigung darauf reduziere, „...daß er ... schon seit mehr als 20 Jahren mit Geistern und abgeschiedenen Seelen in genauesten Umgange stehet...“ (ebenda S. 84).

Kant ist in seiner Einschätzung zu Swedenborg äußerst deutlich, wenn er schreibt (S. 98–99):

„Das große Werk dieses Schriftstellers enthält acht Quartbände voll Unsinn, ...“

„Seine Erzählungen ... scheinen in der That aus fanatischen Anschauen entsprungen zu seyn, und geben gar wenig Verdacht, daß spekulative Hirngespinste einer verkehrtsgrübelnden Vernunft ihn bewogen haben sollten, dieselbe zu erdichten und zum Betrugs anzulegen.“

Die geisterhaften Erscheinungen treffen nun angeblich auf Swedenborgs inneren, verborgenen Sinn (den Kant eher für Wahnsinn hält), welchen man heute als den sechsten Sinn bezeichnen würde. Damit ist gemeint, dass auch Dinge, die mit den üblichen 5 Sinnen nicht erfasst werden können, trotzdem irgendwie bemerkt werden. Heute beschäftigt sich die Parapsychologie mit Phänomenen wie Hellsehen, Wahrsagen, Telepathie oder Geistererscheinungen.

Bei ernsthafter wissenschaftlicher Untersuchung erweisen sich derartige Phänomene jedoch regelmäßig als Unfug oder sind erklärbar. Häufig ist der sechste Sinn die Einbeziehung des Unterbewussten in die Wahrnehmung. Man bemerkt Dinge nicht bewusst, aber bekommt dennoch etwas mit. Ein gutes Beispiel ist dafür der Blick im Rücken. Man dreht sich um und bemerkt, dass man tatsächlich angestarrt wird. Dafür ist kaum der sechste Sinn verantwortlich. Die wahrscheinlichste Erklärung dafür ist, dass man mit den anderen Sinnen (hier besonders Hören und Riechen) gewisse Hinweise unterbewusst aufgenommen hat. Und vergessen wir nicht, dass der Gesichtssinn mit Kopfbewegung immerhin 360° umfasst – also inklusive des Blicks nach hinten.

Wenn man unterstellt, dass Aristoteles mit Gefühl mehr gemeint hat, als den absoluten Tastsinn, sowie das Temperatur- und Feuchteempfinden, dann können auch die Wahrnehmung des Gleichgewichts und des eigenen Körpers mit den fünf Sinnen erfasst

²⁵s. a. Tetraktyz.

werden. Man kann diese Interpretation des Aristoteles vermuten, da er sich fragt, ob es nur ein Gefühls-Organ gäbe oder mehrere, ob das Gefühl etwas Innerliches sei und dabei von mehreren Gefühls-Empfindungen spricht (11. Hauptstück, Vom Fühlbaren und dem Gefühle, aus [34]). Heute werden zu den Sinnen Sehen, Hören, Geschmack, Geruch, Körperbewegung, Gleichgewicht, sowie die Empfindungen der Organe und der Haut gezählt (s. z. B. [36], S. 76). Man käme also auf 8 Sinne.

Doch zurück zu Heilig. Das vierte Gesetz verrät eine vereinfachte Erkenntnistheorie, die wesentlich von den äußeren Eindrücken und einem primitiven Lernprozess durch Nachahmen bestimmt wird. Seine Betrachtung der Darstellung der Welt nach eigenen Wünschen klingt schon ein wenig nach Schopenhauers „Welt als Wille“ [37, 38], verrät aber auch den Künstler.

Bedeutsam ist, dass der Praktiker Heilig es nicht bei seiner bloßen Theorie belassen hat. Er baute mit dem Sensorama ein Gerät, in dem er vier von den fünf Sinnen durch eine Simulation stimulierte. Das Gerät sollte ein vollständiges 3D-Sehen inklusive des peripheren Sehens ermöglichen, Stereo-Sound liefern und dabei gleichzeitig Geruch erzeugen, taktile Empfindungen hervorrufen sowie Wind produzieren. Mit diesem „Umgebungssimulator“ konnte sich Heilig seinen Wunsch zur Gestaltung der äußeren Welt nach seinem Willen erfüllen [39]. Das tatsächliche Gerät war dabei wenig elegant, sondern ein großer Kasten, vor dem man sich setzen und seinen Kopf unter einer Haube an zwei Okulare pressen musste. Um mehrere Besucher gleichzeitig mit der Illusion zu versorgen, hatte Heilig einige Jahre später noch ein komplettes Sensor-Kino entworfen, in dem zusätzlich die Stühle bewegt wurden: Das „Experience-Theather“²⁶ [41].

Zugegebenermaßen waren Sensorama und Experience-Theather immobil, da die Geräte an einen bestimmten Standort ortsfest aufgebaut waren. Wollte man die sensorische Erfahrung genießen, musste man das jeweilige Panorama besuchen.

Heilig hatte aber noch ein anderes Gerät entwickelt, dass im Gegensatz zum Sensorama hochmobil war. Das Gerät, für das Heilig zunächst den Namen „stereoskopischer Fernsehapparat für den individuellen Gebrauch“ verwendete, wurde später als „Telesphere Mask“ bezeichnet [42]. Dieses erstaunliche Gerät erinnert im Aufbau deutlich an heutige VR-Brillen²⁷ (s. Abb. 5.4), war aber im Vergleich zu denen deutlich umfangreicher ausgestattet. Der 3D-Eindruck war vollständig, zum Stereobild und Stereoton kam zusätzlich noch Stereoduft hinzu.

Geruchskino

Es ist überliefert, dass Kinoaufführungen seit Beginn des 20. Jahrhunderts immer wieder von Düften begleitet wurden. Als einer der ersten Auftritte eines beabsichtigten Geruchs im Kino wird die

²⁶Das „Erfahrungs-Theater“ entspricht in etwa dem, was heute als 4D oder 5D-Kino bezeichnet wird, erlebbar z. B. in den Ostsee-Welten5D in Warnemünde [40] (www.ostsee-welten.de).

²⁷Von denen einige aktuelle Vertreter bereits in der Einleitung genannt wurden.

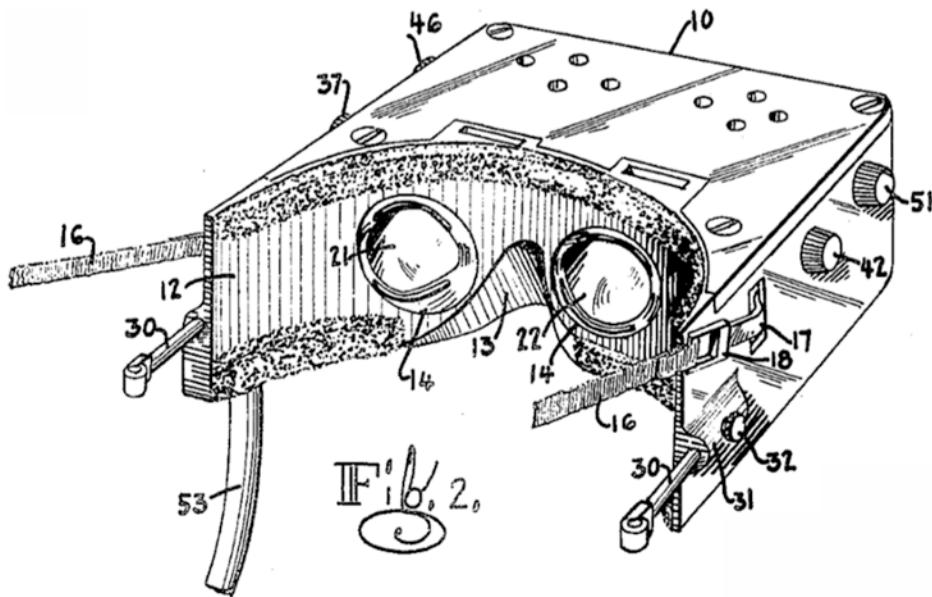


Abb. 5.4 Telesphere Mask, Morton L. Heilig (1957) aus [43]

Aufführung des „Pasadena Rose Bowl Games“²⁸ durch den Showman „Roxy“ Rothapfel genannt. Roxy brachte dafür einfach in Rosenwasser getränktes Watte vor einem starken elektrischen Ventilator an ([45], S. 172). Mit diesem Lösungsansatz war die Begleitung eins längeren Werks kaum möglich.

Der Schriftsteller Huxley erdachte 1932 für seinen Roman „Schöne neue Welt“ auch eine Duftorgel, mit der ganze Riechstücke komponiert werden konnten (aus [46], S. 170)

„Die Duftorgel spielte ein köstlich erfrischendes Kräutercapriccio – kleine Arpeggiowellen von Thymian und Lavendel, Rosmarin, Basilikum, Myrte und Schlangenkraut, eine Folge kühner Modulationen durch die Aromen der Gewürze bis zu Ambra, dann langsam zurück über Sandelholz, Kampfer, Zedernholz und frisch gemähtes Heu (mit gelegentlichen, zart angedeuteten Dissonanzen einer Nasevoll Sauerkraut und einem leisen diskreten Geruch nach Roßäpfeln)...“

Ein paar Jahre nach Huxleys Vision gelang dem Schweizer Erfinder Laube tatsächlich die Kombination von Film und Duft. Sein duftender Film „My Dream“ hatte auf der Weltausstellung 1940 im Schweizer Pavillon Premiere [47]. Sein komplexes System, bei dem die verschiedenen Düfte mit dem Film synchronisiert wurden, hatte zunächst denn sperrigen Namen O.T.P. („Odorated-Talking-Pictures“ [48]), später später Scentovision. Als 1960 der Film „Scent of Mystery“²⁹ in vollem

²⁸Ein legendäres amerikanisches College-Football-Endspiel („The Granddaddy of Them All“ [44]).

²⁹Der Duft des Geheimnisses.

Cinerama und mit programmierten Gerüchen auf die Leinwand gebracht wurde, kam auch ein neuer Name ins Spiel. Der Film wurde präsentiert: „...in Glorious Smell-O-Vision!“³⁰

Der Film war kein Erfolg, ebenso wenig wie der etwa gleichzeitig aufgeführte Geruchsfilm „Behind Great Wall“ mit „AromaRama“ ([50], S. 19–20). Neben den technischen Schwierigkeiten bei der Qualität, der Intensität und des Zeitpunktes der Gerüche waren natürlich auch die Kosten für die Installation der Geräte ein Hindernis.

Das Sensorama war, wie auch die anderen Geruchsexperimente, kommerziell erfolglos. Im Prinzip hatte Heilig damit aber eines erreicht. Er hatte Huxleys Vision von einem „Super-StereoTon-Farben- und -Fühlfilm mit synchronisierter Duftorgelbegleitung“ (aus [46], S. 171) in die Realität befördert.

5.3 Interaktion

Perspektiven des künstlichen Raumes

Die vorgefertigten Filme der Panorama-, 3D- oder Erlebniskinos haben immer eine eingebaute Limitation. Die Ereignisse sind in Abfolge und Blickwinkel festgelegt. Ein aktiver Eingriff ins Geschehen ist nicht möglich. Der Zuschauer ist dadurch an eine feste Perspektive gebunden. Selbst wenn man sich eine 3D-Brille aufsetzt oder die „Telesphere“ Maske am Kopf zu befestigt, ändert sich bei Kopfbewegung trotzdem der Bildeindruck nicht im Geringsten. Das widerspricht dem, was man bei der realen Betrachtung einer Szene wahrnehmen würde.

Ein interaktives Erlebnis wie in Weinbaums „Pygmalion’s Spectacles“ [51] oder ein die Realität vorspiegelndes Gegenauge wie in Lems „Summa technologiae“ [52] lässt sich ohne Interaktion erst einmal nicht bewerkstelligen. Die allgemeine Wunschvorstellung entspricht einer vollständigen Telepräsenz. Damit soll versucht werden, die Realität in all ihren Facetten aufzuzeichnen und die Kopie der wahren Szenerie möglichst umfassend wiederzugeben.

Der Computerwissenschaftler Sutherland beschrieb 1965, zu der Zeit, als Computerdisplays gerade in der Lage waren Buchstaben, Punkte und Linien zu zeichnen, ein kinästhetisches Display. Die Kinästhetik ist die Lehre von der Bewegungsempfindung. Bei Kontrolle der aller Bewegungen könnten die notwendigen Kräfte für die Eingabesysteme kontrolliert (so wie es am Joystick eines Link-Trainers bereits geschah) und die Stellung aller Muskeln inklusive der Augenbewegungen erfasst werden. Damit aber nicht genug. In Sutherlands Vision ist das ultimative Display ein Raum, in dem der Computer

³⁰Von einem Filmplakat des Jagres 1960: „FIRST (1893) They Moved THAN (1927) They Talked NOW (1960) They Smell; MICHAEL TODD, Jr. presents SCENT OF MYSTERY IN GLORIOUS SMELL-O-VISION! The Process to end all Processes“ [49].

auch in der Lage ist, die Materie zu kontrollieren. Auf einem angezeigten Stuhl könnte man sitzen, virtuelle Handschellen würden fesseln und die aus einer simulierten Waffe abgefeuerte Schüsse wären tödlich [53].

Das mutet schon ein wenig seltsam an und erinnert beinahe an das Holodeck auf dem Raumschiff Enterprise³¹, in dem die virtuellen Dinge nicht nur angezeigt werden, sondern sich tatsächlich materialisieren. Die Idee des Holodecks stammt vom Hologramm- und 3D-Enthusiasten Dolgoff. Dolgoff inspirierte den StarTrek-Produzenten Roddenberry zur Idee des Holodecks, in dem computergesteuert aus Energie Materie entsteht [54]. Tatsächlich versucht man sich seit 2014 am Imperial College in London an der Idee der Verwandlung von Licht in Materie [55] auf Basis des vor 80 Jahren beschriebenen Breit-Wheeler-Effekts [56]. So wie im Film funktioniert es allerdings nicht, in den 1960er Jahren, zu Zeiten von Sutherlands Aufsatz, noch weniger.

In der Realität war Sutherland aber durchaus praktikabel. Er entwickelte ein am Kopf montiertes Stereoskop, bei dem der Benutzer durch Veränderung der Kopfposition ein zu der Position angepasstes 3D-Bild angezeigt bekommt³². Dieses heißt nun einfach „head-mounted three dimensional display“ [59]. Das Gerät musste aufgrund des Gewichtes neben der Montierung am Kopf zusätzlich an einer Aufhängung befestigt werden und hing so über dem Benutzer, wodurch sich der spätere Beiname „Damokles-Schwert“ erklärt (s. z. B. [60], S. 360). Im 5. Buch der „tusculanischen Unterredungen“ erzählt Cicero die Geschichte vom „Schwert des Damokles“, in welcher der Tyrann Dionysios seinem Höfling Damokles eine Lektion erteilt, indem er bei einem prächtigen Gelage über dem Damokles ein blitzendes Schwert nur an einem Rosshaar befestigte. Damit wollte Dionysios zeigen, dass für denjenigen, über dem beständig ein Schreckensbild hängt, kein Glück sein kann (nach [61], S. 315).

Obgleich die angezeigten Bilder nur recht einfache geometrische Figuren waren, zeigte das System schon in die Richtung der Interaktion mit der Scheinwelt. Die Bezeichnung „virtuelle Welten“ geht nach dem Computerkünstler Lanier³³ auf die Philosophin Langer zurück und wurde später von Sutherland übernommen [64]. Langer verwendet den Begriff „virtuell“ jedoch recht universell in Verbindung mit Welt, Raum, Szene, Erinnerung, Präsenz u.v.a. in ihrer Theorie der Kunst „Feeling and Form“ [65]. Im Prinzip kreiert die Kunst immer etwas Virtuelles.

³¹Ab 1974, zuerst in der StarTrek Animated Series, Episode „The Practical Joker“, bei der sich Uhura, Sulu und McCoy auf dem Holodeck mit der ungezügelten Materie (in Form von Fallgruben und Schneesturm) herumschlagen müssen.

³²Wobei neben dem stereoskopischen Effekt auch der kinetischer Tiefeneffekt als raumstiftend erwähnt wird (s. z. B. [57, 58]).

³³Dem Computerkünstler Lanier wird die Erfindung des Begriffs „virtuelle Realität“ zugeschrieben, der allerdings schon von Broderick 1982 in seinem Buch „The Judas Mandala“ [62] verwendet wurde. Der Begriff „virtual reality“ findet sich überdies auch schon 1938 in dem Buch „The Theater and Its Double“ des außergewöhnlichen Regisseurs und Theatertheoretikers Artaud ([63], S. 49).

Laniers virtuelle Realität ist aber umfassender (aus [66], S. 15):

„Für mich bedeutete Virtual Reality ursprünglich, über das Headset-Erlebnis hinaus auch andere Elemente einzubeziehen, einschließlich der Anwesenheit des eigenen Körpers, um einen Avatar zu haben, um Dinge aufnehmen zu können, und wo sich mehrere Personen aufzuhalten können, ...“

Zu einer Interaktion mit der künstlichen Welt benötigt man neben dem Bild auch eine Form der Eingabe. Eine der ersten Ideen dieser Art hatte Sutherland selbst, der 1964 mit dem „light pen“ ein grafisches Eingabesystem für seinen Zeichencomputer „Sketchpad“ entwarf [67]. Der „Lichtstift“ hatte die Größe eines Füllfederhalters und bestand im Wesentlichen aus einer Fotozelle mit einem Schalter. Die Fotozelle maß das Licht eines Musters, das auf dem Bildschirm angezeigt war und konnte anhand der Messungen die Bewegung des Stiftes bestimmen.

Das RAND Tablet von Davis und Ellis aus dem gleichen Jahr [68] war die Low-Cost-Variante des Sketchpad³⁴. Neben dem Preisvorteil war das RAND-Tablet im Gegensatz zum raumgroßen Sketchpad-System ein beinahe praxistaugliches Gerät. Allerdings waren Sketchpad und RAND-Tablet nur in der Lage, zweidimensionale Informationen zu erfassen.

1966 hatte Roberts, wie Sutherland am Lincoln Laboratorium des MIT beschäftigt, mit dem „Lincoln Wand“ eine Art von Zauberstab erfunden, um Sutherlands „light pen“ und das RAND-Tablet mit einer dritten Dimension zu erweitern. Dazu verwendete Roberts vier Ultraschallsender und einen Empfänger. In Abhängigkeit von der Entfernung zwischen dem Zauberstab-Empfänger und den Sendern änderte sich die Laufzeit der periodisch nacheinander von allen Sendern abgebenden Signale. Nach Roberts Angaben war die Bestimmung der Position des Stabes in einem Raum von $1,2 \times 1,2 \times 1,6$ m mit einer Genauigkeit von etwa fünf Millimetern möglich [70].

Lanier hatte die Vision einer sozialen Interaktion mit der virtuellen Realität, die Schaffung eines Begegnungsraumes der eigenen Telepräsenz mit anderen Avataren. Das ist nun genau das Gegenteil der häufig proklamierten isolierenden Wirkung eines Head-Sets und der damit einhergehenden Gefahr des sozialen Ausgegrenztheit („digitaler Autismus“, s. a. [71] ab S. 69). Auch für den Computerwissenschaftler Minsky war die Interaktion ein Hilfsmittel zur Erzeugung einer Telepräsenz. In Minskys Vorstellung trägt der Nutzer während der Telepräsenz eine bequeme Jacke mit Sensoren und muskelartigen Motoren. Jede Bewegung der Arme, Hände und Finger wird aufgezeichnet und an anderer Stelle auf einem mechanischen Gegenpart wieder rekonstruiert. Dadurch kann jedwede schwere oder gefährliche Arbeit auch in unmöglichen Umgebungen erledigt

³⁴Immerhin noch 18.000 Dollar (s. [69]), aber vergleichsweise billig gegen die von Sutherland verwendeten Lincoln TX-2-Computer, einer MIT-Entwicklung, die zu ihrer Zeit zu den größten und leistungsstärksten Computern der Welt gehörten.

werden. Natürlich wird auch ein entferntes Auge benötigt, wofür Minsky 1980 die Lösung von Philco³⁵ vorschlägt [74].

Der amerikanische Student Fisher führte bereits in seiner Master-Arbeit, aus, das eine reine Duplikation einer Szene nicht zu einer echten Interaktion führen kann und schlug folgerichtig eine positionsabhängige Bildanzeige vor [75]. Als NASA-Ingenieur wollte Fisher, gemeinsam mit dem Fake-Space-Gründer Bolas, Minskys Idee der Telepräsenz tatsächlich realisieren. Ihnen schwebte etwas größeres vor, als eine „personalisierte Fernsehsafari“, wie sie Clarke in seinem Essay über das zweite Jahrhundert des Telefons beschrieb [76]. Dazu bemühten sie zunächst einen anderen Science-Fiction-Schriftsteller, den Amerikaner Heinlein. Heinlein lässt 1942 in der Kurzgeschichte „Waldo“ seinen körperlich schwachen Protagonisten komplizierte und schwere Aufgaben auf über weite Entfernungen durchführen. Waldo hat dabei ein körperloses Selbstbild (aus der deutschen Übersetzung [77]):

„Waldo sah sich nicht als einen kranken, krüppelhaften Menschen, sondern als etwas Höheres, als ein höherentwickeltes und überlegenes Wesen, das der rohen, brutalen Kraft der nackten Affen nicht bedurfte.“

In Heinleins Fiktion kann Waldo seine körperliche Behinderung überwinden, indem er zum Beispiel seine Hände in ein Paar mechanische Handschuhe steckt, die seine Bewegungen auf ein weit entferntes zweites Paar Handschuhe überträgt. Dabei kann Waldo seine entfernten Bewegungen am „Stereo-Farbenfernsehempfänger“ kontrollieren.

Eine Schlüsselkomponente bei der Fernsteuerung der Telepräsenz auf anderen Planeten ist das Sehen und damit die interaktive Fernsteuerung der Kamera. Eine solche Lösung entwickelten Bolas und Fisher auf Basis einer ferngesteuerten Stereokamera. Dies Kamera kann durch Kopfbewegung des Head-Mounted-Displays [78] gesteuert werden und liefert 3D-Bilder, die der Blickrichtung des Betrachters entsprechen. Das Projekt erhielt von der NASA den Namen VIEW lab (Virtual Interface Environment Workstation).

Eine etwas andere Sicht auf die Umgebung hatte der Computerkünstler Krueger. Er wollte, dass die Umgebung mit dem Nutzer interagiert, der virtuelle Raum also unvorhersehbare Weise auf die Bewegungen des Nutzers reagiert. Das wurde bei der ersten Installation namens GLOWFLOW technisch durch auf dem Boden verteilte Sensoren erreicht, sodass der Computer das Licht und den Sound in einem dunklen Raum abhängig von der Benutzerposition schalten konnte. Die METAPLAY-Installation war schon etwas ausgefeilter und erlaubte die grafische Interaktion auf einem $2,5 \times 3$ m großem Bildschirm. Am bekanntesten ist aber sicherlich Kruegers VIDEOPLACE, bei dem mehrere entfernte Orte miteinander gekoppelt werden. Auf dem Bildschirm innerhalb

³⁵Amerikanischer Elektro- und Elektronikhersteller, stellte ab den 50er Jahren auch Fernseher und Computer her ([72], S. 7–8), entwickelte 1961 eine Remote-Brille mit dem Namen „Headsight“ [73].

des abgedunkelten Raumes sieht der Besucher sich oder die entfernten Personen in einem zusammengesetzten Bild in Lebensgröße. Dadurch, dass alle beteiligten Räume gleichartig sind, kann der Eindruck entstehen, als bewegten sich alle Personen im gleichen Raum [79].

Ein einzelner Bildschirm kann keine realistische Umgebung simulieren. Natürlich lässt sich der Bildschirm vergrößern³⁶ oder aus einzelnen kleineren Bildschirmen zusammensetzen³⁷. Dabei bleibt immer das Problem, dass der durch ein Display gebildete Raum den Betrachter nicht vollständig umgibt – wie es ein echter Raum oder eine Höhle tun würde. Tatsächlich beziehen sich die Entwickler bei der Namengebung der CAVE³⁸ auf Platons antikem Höhlengleichnis [84]) und bauen quasi eine künstliche Höhle. Eigentlich ist die Höhle aber ein Würfel, bei dem zudem alle sechs Flächen Projektionsflächen sein können. Im Zusammenspiel mit Systemen zur Detektion der Körper-, Kopf- und Handbewegungen lässt sich mit einem solchen System eine wirkliche virtuelle Realität erschaffen.

Die Ideen für die Eingabegeräte ergeben sich fast wie von selbst. Der Primärhandschuh von Heinleins Waldo ist schon fast ein Konzept. Bei der Entwicklung von neuartigen Eingabegeräten zur „Humanisierung digitaler Computer“ hatten DeFanti und Sandin basierend auf einer Idee von Sayre einen speziellen Sensor vorgeschlagen, der durch die Handbewegungen unterschiedlich stimuliert wird (aus [85], S. 6):

„Die grundlegende Idee ist es, eine Lichtquelle an ein Ende eines flexiblen Röhrchens und eine Fotozelle an das andere Ende zu setzen. Wenn das Röhrchen gebogen oder zusammengepresst wird, reduziert sich auch die Menge des auf der Fotozelle auftreffenden Lichtes“

Mit der Humanisierung digitaler Computer war gemeint, dass sich die Eingabegeräte eher an die menschliche Physis und Psyche anpassen sollten – nicht umgekehrt. Sandin war mit der Virtualität schon ein wenig vertraut und bereits mit Krueger im GLOW-FLOW involviert. DeFanti und Sandin waren später gemeinsam auch an der Entwicklung von CAVE und Infinity Wall beteiligt und sind damit echte VR-Veteranen. Richard „Rich“ Sayre hatte jedoch die entscheidende Idee ([85], S. 6, s. a. [86]) und so kommt es, dass der Handschuh als „Sayre-Glove“ nur nach ihm benannt ist.

Im Sayre-Glove konnte über die Spannung der Fotozelle auf die Krümmung des Röhrchens und damit der Finger geschlossen werden. Allein die Beugung der Finger

³⁶z. B. PowerWall der Universität von Minnesota (ca. 2,4 m breit [80]) oder der Infinity Wall der Universität von Chicago (ca. 3,6 m breit [81]).

³⁷Oder der NASA hyperwall (ca. 3,2 m [82]), allerdings aus 49 Einzelbildschirmen aufgebaut, wobei die Begrenzung 7×7 auf der Millerschen Zahl beruht (im Kurzzeitgedächtnis können nur etwa 7 Dinge gleichzeitig abgelegt werden, nach Miller 1956 [83]).

³⁸„CAVE Automatic Virtual Environment“, das rekursive Akronym (eine Abkürzung, die ausgeschrieben wieder die Abkürzung als Wort enthält) beschreibt eine Höhle mit automatisierter und virtueller Umgebung.

ist wenig aussagekräftig über die Position der Hand. Nur wenige Jahre nach dem Sayre-Handschuh stellt Grimes von den Bell Labs eine deutlich verbesserte Lösung vor. Auch Grimes schlug zunächst ebenfalls optische Krümmungsmesser vor. In seiner Patentschrift [87] ist ein solcher Sensor abgebildet, der auch als Erläuterung für die Funktion des Sayre-Glove gelten darf. Die Abb. 5.5 zeigt den Finger im Handschuh (100). Im oberen Teil der Zeichnung ist der Finger gerade, im unteren Teil gekrümmt. Auf dem Fingerrücken ist der Knöchelbiegesensor (102) montiert. Die Röhre ist bei Grimes aus zwei Teilen aufgebaut (im Sayre-Glove war es eine durchgehende Röhre). Die kleinere Röhre (405) ist in eine Röhre mit größerem Durchmesser eingeschoben, wodurch sich die Röhre auf einfachste Weise bei Fingerbiegung verlängert. Die

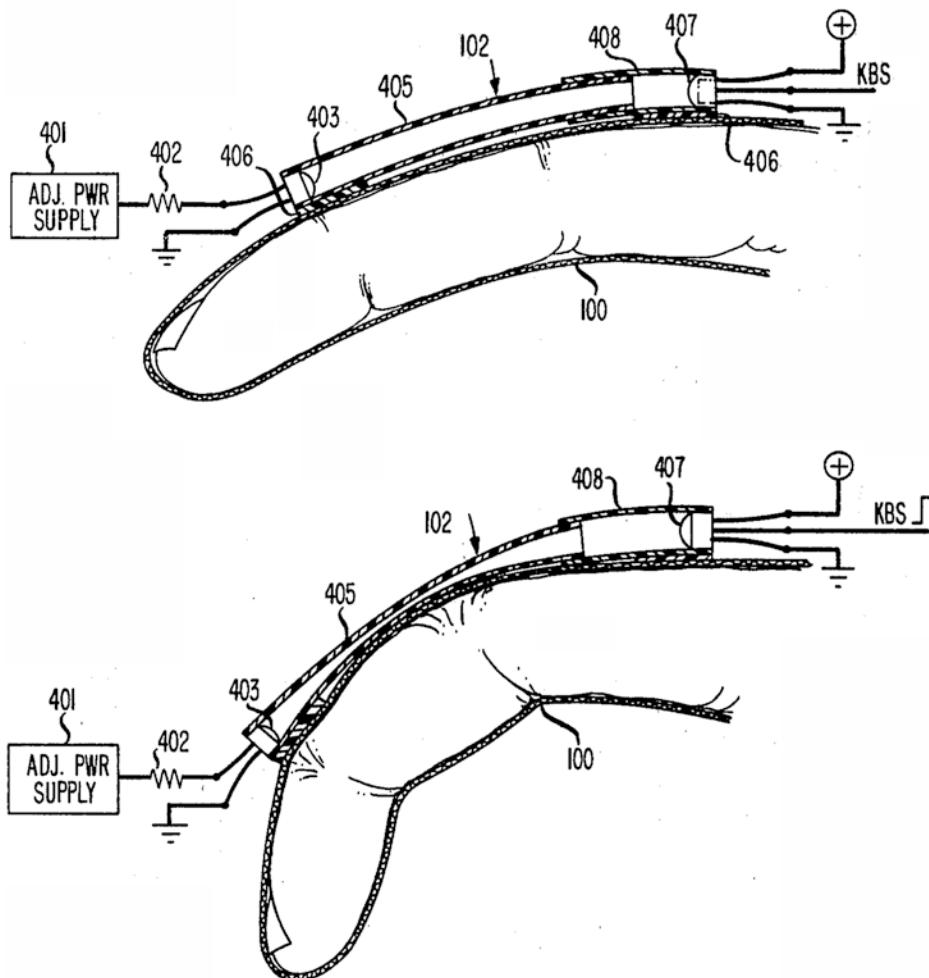


Abb. 5.5 Knuckle-Bend-Sensor, Gary J. Grimes, 1981 aus [87]

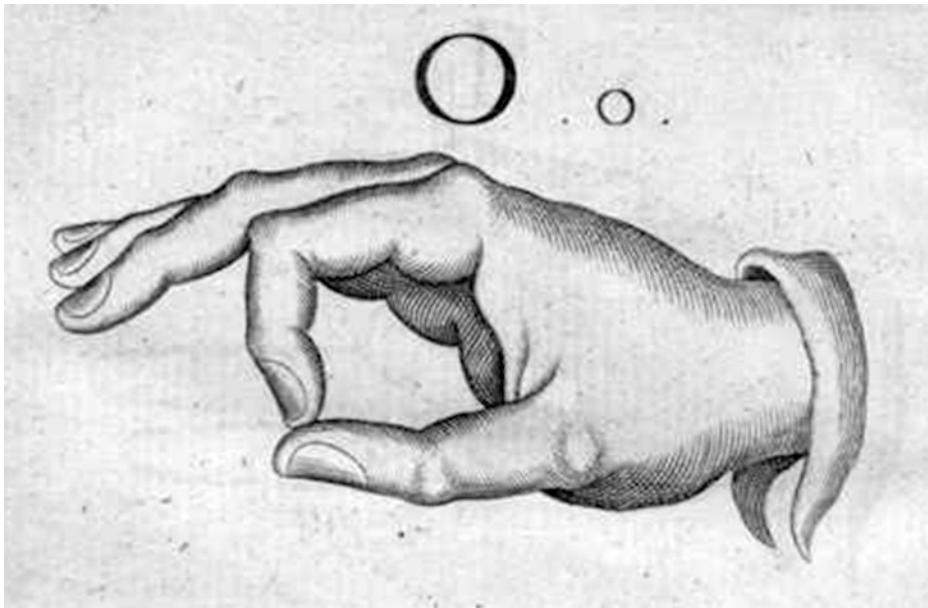


Abb. 5.6 Fingeralphabet „O“, Juan Pablo Bonet (1620) ABECEDARIO (Spanisch für ABC) Demonstrativo, S. OPQ

Wand des Röhrchens ist flexibel und lichtundurchlässig. Auf der linken Seite befindet sich eine Infrarot-Diode (403) und auf der gegenüberliegenden Seite ein geeigneter Detektor (406)³⁹. Dieser Sensor wird je nach Biegung des Fingers mit mehr oder weniger Licht bestrahlt. Erreicht die Lichtmenge den gewünschten Schwellwert, schaltet der Schmitt-Trigger und das KBS-Signal (Knuckle Bend Signal) wird abgesetzt, wenn der Finger ausreichend gebogen ist.

Eine beabsichtigte Anwendung der Handschuhe sollte die Eingabe von Daten mittels des Einhand-Fingeralphabets⁴⁰ sein. Da sich beim Fingeralphabet auch bestimmte Teile der Hand berühren (z. B. Daumen und Zeigefinger für „O“ s. Abb. 5.6) musste der Handschuh mit Touchsensoren⁴¹ bestückt sein, die geeignete am Handschuh positioniert waren. Die Ausrichtung der Hand im Raum bezüglich der Schwerkraft wurde mit

³⁹Bei Grimes ein „Optoschmitt“, ein Fotodetektor, der eine Photodiode, einen Verstärker und den namensgebenden Schmitt-Trigger beinhaltet (nach Otto Schmitts „thermionic trigger“ [88]).

⁴⁰Basis für das Fingeralphabet ist die Veröffentlichung des Spaniers Bonet aus dem Jahre 1620 „Reducción de las letras y arte para enseñar a hablar a los mudos“ (Zusammenfassung der Buchstaben und der Kunst, den Stummen das Sprechen Beizubringen) [89].

⁴¹Grimes benutzte mit Silber gefüllte leitende Gummipads.

Neigungssensoren⁴² bestimmt, die relative Bewegung über Trägheitssensoren⁴³ ausgewertet.

VPL-Research⁴⁴ entwickelte für die NASA den DataGlove, einen Handschuh, der für Astronauten geeignet sein sollte. Die Idee dafür kam eigentlich von dem Ingenieur Zimmerman, der 1984 mit Lanier, dem Gründer von VPL zusammentraf. Zimmerman entwickelte gerade ein Paar Kabel-Handschuhe, da er wie Jimmy Hendrix mit diesen Handschuhen auf einer virtuellen Luftgitarre spielen wollte. Lanier, der eigentlich Musiker werden wollte, war fasziniert von Zimmers Idee und erkannte das Potenzial für die Virtuelle Realität (aus [90], S. 90). Letztendlich gewann VPL den Auftrag der NASA und entwickelte funktionstüchtige Datenhandschuhe die im Zusammenspiel mit Fishers Head-Mounted-Displays ihre Wirkung in Fishers Telepräsenz-VIEW-System entfalten konnten. Die Grundlage für VPLs Handschuhe waren die von Zimmerman entwickelten „optischen Flex-Sensoren“ [91]. Die Flex-Sensoren bestehen ebenfalls aus einem flexiblen Schlauch wie bei Grimes, allerdings ist hier nun die Innenwand reflektierend. Auch hier ist an einer Seite die Lichtquelle angebracht, auf der anderen Seite ein Lichtsensor, der seinen Widerstand in Abhängigkeit im auftreffenden Licht ändert (z. B. ein Fototransistor oder eine Fotozelle). Dadurch lässt sich nicht nur der Zustand detektieren, ob überhaupt ein Finger gekrümmmt wurde, sondern auch die Stärke der Biegung durch den Widerstand der Handschuhe feststellen. Zusätzlich wurden in VPLs DataGlove zur Bestimmung der Position und Orientierung der Hände im Raum die magnetischen „3SPACE“-Sensoren von Polhemus verwendet, die auf Basis von Kuipers Tracking und Lagebestimmung funktionierten [92].

Nintendos Power Glove

Der von Zimmerman und Lanier entwickelte Handschuh war für sich genommen schon sehr teuer⁴⁵, im Set mit dem eigenen Head-Mounted-Display „EyePhone“, dem Datenanzug „Data-Suit“ und dem notwendigen Computer nebst Applikationen (das „RB2 Virtual Environment“) für den Privatbenutzer vollkommen unerschwinglich⁴⁶. Eine New Yorker Spielzeugentwickler Namens Abrams/Gentile (AGE) erwarb die Rechte zur Nutzung von VPL DataGlove Idee. VPLs Handschuhe der 2. Generation waren sehr aufwendig, da man mit versuchte, mit Glasfasern und noch mehr Sensoren die Fehlerrate der Handschuhe zu verringern. Dazu wurde beispielsweise die Oberfläche der Glasfaser an einigen Stellen aufgeraut und über diesen Sensoren platziert. So konnte bei Biegung der Finger, das Licht an diesen Stellen austreten (s. z. B. [93]). AGE versuchte in den Kostenrahmen für ein Spielzeug zu gelangen und fokussierte sich auf die Vereinfachung der Technik. Um die Datenhandschuhe erheblich preiswerter zu machen, entwickelte man einen einfachen Sensor. AGE's

⁴²Hier mit Quecksilber gefüllte Röhrchen (Quecksilberschalter).

⁴³Trägheitsschalter; der Kontakt schließt sich, wenn eine bewegliche Masse (hier eine Kugel) durch Beschleunigung eine haltende Kraft überwindet (hier einen Magneten).

⁴⁴Von Lanier gegründet, VPL ist die Abkürzung für „Virtual Programming Language“.

⁴⁵9000 US\$ (aus [90], S. 91).

⁴⁶Ca. 400.000 US\$ für 2 Benutzer (ebenda).

Abb. 5.7 „Power Glove“, Grant Goddard and Samuel Cooper (1989) for Abrams Gentile Entertainment (AGE), Digital Game Museum Collection, abgerufen am 8. September 2019 von www.digitalgamemuseum.org/collection/items/show/693



Lösung basierte auf einem flexiblen, leitfähigen Material⁴⁷, dessen Widerstand sich bei Biegung änderte. Der Spielzeughersteller Mattel baute daraus gemeinsam mit AGE den „Power Glove“, der als Eingabegerät für Nintendos Spielkonsole dienen sollte und für einen Preis von 89 US\$ angeboten wurde [96]. Trotz des akzeptablen Preises war auch dieser Handschuh kein Erfolg (Abb. 5.7).

Der Ingenieur und Mathematiker Kuipers entwickelte anfangs der 1970er Jahre eine Technik, auf deren Basis die relative Position eines entfernten Objektes anhand eines Magnetfeldes bestimmt werden konnte. Dazu wurde mit den drei Spulen⁴⁸ quasi ein Koordinatenrahmen aufgespannt. Der Empfänger wird ebenfalls durch drei Spulen gebildet, die das Magnetfeld der Sender erfassen [97]. Vereinfacht gesagt, kann über die Spulen des Empfängers aus den Feldern des Senders die Richtung und Position des Objektes bestimmt werden. Kuipers hat den Prozess später noch einmal ausführlich in seinem Buch „Quaternionen⁴⁹ und Rotationssequenzen“ beschrieben [99] (ab S. 303). Kuipers Erfindung wurde von dem Militärpiloten Polhemus zum Patent angemeldet und als Produkt unter dem Namen ROPAMS (Remote Object Position Attitude Measurement

⁴⁷Was im einfachsten Fall eine elektrisch leitfähige Farbe sein konnte. AGEs Patent [94] ist die Basis für heutige Flex-Sensoren z. B. von Spectra Symbol oder Flexpoint Sensor Systems (s. [95]).

⁴⁸Spulen, die ein Magnetfeld emittieren.

⁴⁹Quaternionen sind eine mathematische „Vereinfachung“ durch Erweiterung der reellen Zahlen auf vier Dimensionen, die in der Computergrafik und Robotik Anwendung finden. Erfunden wurden die Quaternionen vom irischen Mathematiker Hamilton [98].

System) vermarktet. Dieses kleine Gerät mit nur einer Seitenlänge von etwa zwei Zentimetern⁵⁰ wurde von Bolt in einer 3D-Raum-Installation⁵¹ verwendet. Dabei wurde der Raum wie ein privates Büro gemütlich eingerichtet. Der Benutzer saß in einem Eames-Lounge-Chair mit Vinylbezug⁵², auf dessen Armlehnen Joysticks und Touchpads montiert waren [100]. Der Nutzer nahm den Polhemus-Space-Tracking-Sensor in die Hand und der Computer wusste genau, worauf der Nutzer auf dem großen Display im Media-Room zeigte. Dadurch konnte eine vertraute Bedienung des Bildschirms erfolgen [101]. Man zeigt auf eine Stelle, sagte was man wollte und der Computer tat es. Sagte der Benutzer also „Create a yellow circle there“, malte das Programm einen gelben Kreis genau an die Stelle, an die der Benutzer soeben gezeigt hatte.

Im Media-Room war eine gewisse Interaktion möglich. Die reduzierte Eingabe durch einen Fingerzeig entspricht noch nicht dem, was ein engagierter Nutzer sich unter der eigenen Interaktion im und mit dem virtuellen Raum vorstellen kann. Dazu reicht die Bestimmung der Position von Händen und Fingern allein nicht aus. Notwendig wäre ebenfalls die Bestimmung der Lage weiterer Gliedmaßen. Einen ersten Schritt in diese Richtung machte Harrison 1960. Er hatte die Idee, den Elektronenstrahl eines Röhrenbildschirms so zu bewegen, „wie den Pinsel eines Künstlers“ (aus [102]). Interessant war sein Ansatz, die Bewegung eines realen Menschen direkt an eine Figur auf dem Bildschirm zu übertragen. Zunächst entwickelte Harrison den „Bone Generator“, der einfache Linien erzeugte, die über eine Elektronik definiert bewegt werden konnten. Damit wurde ein einfaches Strichmännchen gebildet, das sich wie von Harrison gewünscht bewegen konnte. Der Clou war allerdings die Übertragung der Bewegung von einer realen Person⁵³ auf das Röhrenwesen. Mit einfachen Potenziometern, die mit Materialien aus Spielzeugbaukästen⁵⁴ und Gummiband an den Gelenken des Originals befestigt waren, führte das Strich-Pendant deren Tanzschritte in Echtzeit aus.

Die beiden Studentinnen Ginsberg [103] und Maxwell [104] vom Massachusetts Institute of Technology arbeiteten gemeinsam bei Negroponte, der am MIT mit Bolt maßgeblich am „Media Room“ beteiligt war, an einem Projekt für eine „grafische Marionette“. Dabei sollte die menschliche Bewegung möglichst vollständig aufgezeichnet werden um diese, wie bei einer Marionette, anhand der Eingabe auf einem grafischen System wiederzugeben. Dazu wurde ein einfaches Körpermodel geschaffen, dass den Körper in Bereiche einteilt, aus dessen Position im Raum auf die Anordnung des gesamten Körpers geschlossen werden konnte (Abb. 5.8).

⁵⁰Das ist die Größe des Empfängers, der Sender war etwas größer.

⁵¹Der Media Room der Architecture Group am Massachusetts Institute of Technology.

⁵²Ein Clubsessel nach dem Entwurf der amerikanischen Designern Charles und Ray Eames, der bis heute verkauft wird.

⁵³Abgebildet ist dazu regelmäßig eine Tänzerin im blauen Suit mit allerlei Drähten und diversen Befestigungshilfen für die Potenziometer.

⁵⁴Etwas „Tinker Toys“ oder „Lincoln Logs“.

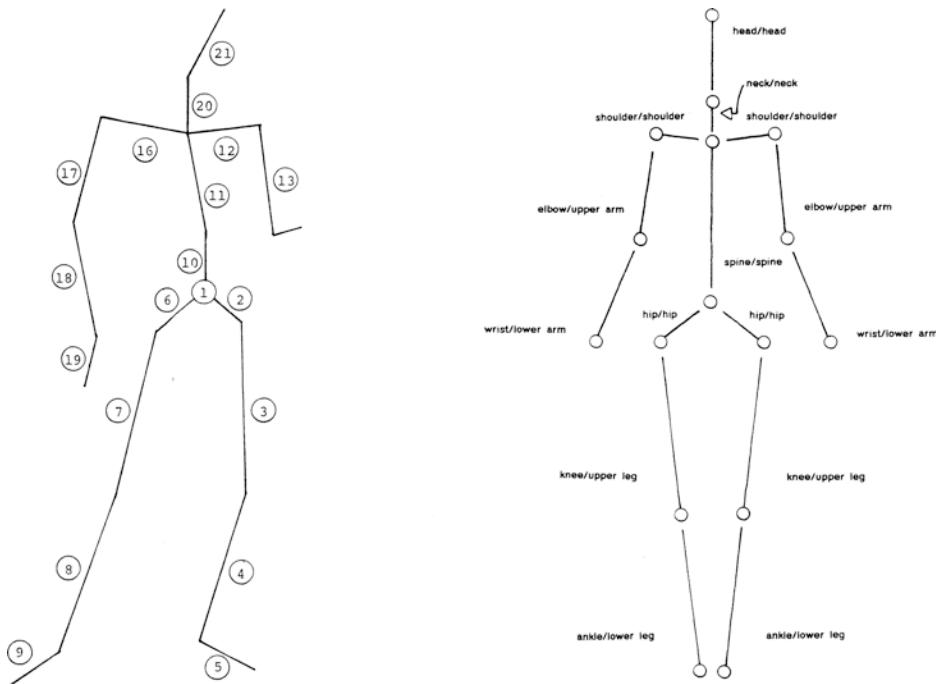


Abb. 5.8 Node Numbering, Delle Rae Maxwell (1983) aus [104], S. 46 (l) und S. 76 (r)

An bestimmten Punkten des Körpers, bevorzugt an Gelenken oder anderen prominenten Orten, wurden LEDs befestigt, die in definierter Art blinkten. Die Trägerin des LED-Anzugs wurde von zwei Kameras aufgenommen, die nun die Bilder an das Op-Eye-System⁵⁵ sendeten. Das ganze System arbeitete im Infrarotbereich, sodass es vom Umgebungslicht einigermaßen unbeeinflusst blieb.

Auf dem Display des angeschlossenen Apple II konnte man schließlich die tanzenden Striche sehen, die sich im Rhythmus des Originals bewegten. Obgleich die Erfassung der Raumposition von LEDs mit Kameras schon in den 1980er Jahren für sich allein genommen keine bahnbrechende Entwicklung war⁵⁶, hatten die beiden Damen eine Applikation gefunden, die seitdem als „Motion Capture“ (Bewegungserfassung) weite Verbreitung gefunden hat. Man kann dabei als Marker optisch aktive Elemente⁵⁷ oder

⁵⁵Von United Detector Technologies (heute OSI Optoelectronics).

⁵⁶Das Prinzip beruht auf Stereometrie und Triangulation und wurde vorher mit dem bereits erwähnten Op-Eye, als auch von Woltrings System namens SELSPOT (SElective Light SPOT recognition) [105, 106] oder Burtons und Sutherlands „Twinkle Box“ [107] gezeigt.

⁵⁷In irgendeinem Teil des elektromagnetischen Spektrums emittierende Sender.

passive Marken⁵⁸ einsetzen, eine größere Zahl von Kameras verwenden oder in anderen Spektralbereichen⁵⁹ arbeiten, um eine höhere Erfassungsgenauigkeit zu erhalten. Der Grundsatz ist dabei immer der gleiche. Man erfasst einen Punkt mit mindestens zwei Kameras und kann diesem zu jedem Zeitpunkt triangulieren⁶⁰. Mit diesen und den vorgenannten Sensoren für Beschleunigung, Lage und Gelenkstellung lassen sich auch komplette Sensor-Anzüge nähen. Minskys Idee von der bequemen Sensorjacke wird Realität. Solche Mocap-Suits (auch „Mo-Cap“, Motion Capture Suit „Bewegungserfassungsanzug“) wurden von VPL mit dem DataSuit schon in den 1980er Jahren verkauft (s. [90] S. 90).

Heutige Sensoren sind in der Regel hochintegriert und nutzen im Zusammenspiel mehrere Technologien. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, zur Bestimmung der Position eines Objektes die Lage⁶¹, Beschleunigung⁶² und Drehung⁶³ verschiedener Messpunkte zu bestimmen. Um alle möglichen Bewegungen zu erfassen, muss jeder Sensor für jede Achse vorhanden sein. Im dreidimensionalen Raum wird die Position über die x-, y- und z-Achse bestimmt, sodass die drei unterschiedlichen Sensoren jeweils drei Mal vorhanden sein müssen, also für jeden Messpunkt neunfach existieren. Zur weiteren Verbesserung werden mittunter noch GPS⁶⁴ oder Kompass hinzugefügt. Die erhobenen Daten werden intelligent verarbeitet⁶⁵ und erlauben dadurch eine sehr genaue Vorhersage der Position. Die neun Einzelsensoren sind üblicherweise in einem Gehäuse gemeinsamen Gehäuse untergebracht und erscheinen dem Benutzer so als ein einzelner Sensor. Um den Sensor nun mit dem Körper des Nutzers zu verbinden, kann man die Sensoren mit Gummibändern oder Klettband an den Gliedmaßen und am Kopf befestigen. Solche „Animac“-Lösungen präferieren z. B. die niederländische Firma „XSens Technologies“, die amerikanischen „Yost Labs“ oder das chinesische Unternehmen „Noitom Perception Neuron“.

⁵⁸Z. B. retroreflektierende Materialien, die ein bestimmtes Spektrum reflektieren.

⁵⁹Sowohl innerhalb des elektromagnetischen Spektrums (z. B. sichtbares Licht, Infrarot, Ultraviolet), als auch außerhalb dessen (z. B. mechanische Schallwellen, insbesondere Ultraschall).

⁶⁰Die Position des angepeilten Punktes aus den beiden Winkeln der Kameras zum Punkt und der Basislänge (dem Abstand der beiden Kameras) bestimmen.

⁶¹Bei Bezug auf das Magnetfeld der Erde wird ein Magnetfeldsensor verwendet.

⁶²Beschleunigungs-, Translations- bzw. Trägheitssensor mit Bezug zum Gravitationsfeld der Erde.

⁶³Drehraten- bzw. Gyroskopischer Sensor (von griech. gyros = Kreisel).

⁶⁴Global Positioning System, ein ursprünglich vom US-Militär entwickeltes Navigationssatelliten-System zur Positionsbestimmung, offiziell „Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System“ (NAVSTAR GPS).

⁶⁵z. B. beim Yost Labs 3-Space Sensor mit einem „on-board quaternion-based orientation filtering“ Algorithmus [108].

Heute könne die VR-Suits aber auch durchaus professionell aussehen. Die Benutzung solcher Anzüge lässt den Träger nun nicht mehr wie einen seltsamen Nerd⁶⁶ erscheinen, sondern kann diesem auch zu einem Superhelden-Feeling verhelfen. Der „Teslasuit“-Anzug des englischen Unternehmens VR Electronics verfügt zudem nicht nur über Sensoren zur Bewegungserkennung, sondern liefert auch per Elektrostimulation⁶⁷ ein taktiles Feedback. Darüber hinaus lässt sich der Anzug selektiv erwärmen, sodass auch hier eine körperliche Stimulation erreicht werden kann. So kann die Einwirkung von Wärme beim virtuellen Durchschreiten eines Feuers ein reale Wahrnehmung erzeugen. Ähnliche Anzüge gibt es auch vom dänischen Unternehmen Rokoko Electronics (als Smartsuit ohne Feedback) oder vom indischen Startup Kaaya Tech (als Holosuit mit Feedback).

Neben Hose, Jacke und Handschuhen des realen Anzugs benötigt man zum Eintauchen in die virtuelle Welt noch ein Head-Mounted-Display. Natürlich möchte niemand ein Damoklesschwert über sich hängen haben, sondern es besteht ganz natürlich der Wunsch nach einem leichten und preiswerten System.

Der junge Amerikaner Luckey hatte Vergnügen daran, die frühen, ehemals unbezahlbaren Head-Mounted-Displays zu ersteigern, hegte aber zugleich den eingangs beschrieben Wunsch, nach etwas Besserem. Durch das Zerlegen der Systeme erlangte er ein Verständnis für den Aufbau solcher Systeme. In der kleinen VR-Gemeinde der frühen 2010er Jahre wurde der Spieleentwickler Carmack⁶⁸ auf Luckeys Idee der leichten Brille aufmerksam und entwickelte schließlich eine Version des Spieles Doom für Luckeys Brille [111]. Durch Carmacks Unterstützung wurde die Idee bekannt und die Firma Oculus erfolgreich. Die erste verfügbare Brille war die Oculus Rift in der Developer Version (Abb. 5.9).

Die Oculus Rift und sicherlich auch die Übernahme von Oculus durch Facebook⁶⁹ lösten einen regelrechten VR-Brillen-Hype⁷⁰ aus. Ein prominentes Beispiel dafür ist die „Magic Leap“-Idee. Der Ingenieur Abovitz hatte schon mit seinem Unternehmen wirtschaftlichen MAKO Erfolg⁷¹. Die innovative Firma hatte zahlreiche Patente auf dem Gebiet der roboterunterstützten Chirurgie angemeldet und Roboterarme entwickelt, die in Operationen eingesetzt werden konnten. Eine Spezialität des Unternehmens war die Erzeugung eines haptischen Feedbacks für den Chirurgen während der Operation

⁶⁶In der Bedeutung des hochintelligenten und computerfanatischen Außenseiters, ein wunderbares Beispiel für einen Nerd ist der kanadische Informatikprofessor Steve Mann, der seit Jahrzehnten mit den wunderlichsten, selbstgebauten VR-Brillen in der Öffentlichkeit auftritt [109].

⁶⁷Neuromuscular electrical stimulation (NMES, s. z. B. [110]), zu Deutsch „Reizstrom“.

⁶⁸Bekannt für die Spiele Wolfenstein und Doom, die es beide in Deutschland auf den Index geschafft hatten, aber auch überaus bekannt sind.

⁶⁹2014 für unglaubliche 2 Mrd. US\$ an Facebook verkauft [112].

⁷⁰Z. B. Sony PlayStation VR, Valve Index oder HTC Vive.

⁷¹Verkauft 2013 für 1,65 Mrd. an Stryker [113].



Abb. 5.9 Oculus Rift – Developer Version, Sebastian Stabinger „Petheus“ (2013), Wikimedia Commons

(s. z. B. [114, 115]). Abovitz selbst war an einigen Patenten beteiligt und durch diese Entwicklungen mit der Interaktion im Raum und der virtuellen Realität vertraut. Durch den Verkauf seines Unternehmens war Abovitz finanziell unabhängig und konnte seiner Vorstellung einer virtuellen Realität folgen. Der exzentrische Abovitz war 2012 auf der TEDx-Konferenz in Sarasota eingeladen, um als erfolgreicher Medizin-Unternehmer und Unternehmensgründer einen Vortrag zu halten. Er tat dies auf ungewöhnliche Weise, indem in einem Raumanzug steckend, von einem grünen und einem roten haargen Monster begleitet, auf die Bühne trat und nach dem Abspielen der Musik von Space Odyssee⁷² nur einen Satz sagte:

„Ein paar ungelenke Schritte für mich, ein magischer Sprung für die Menschheit“⁷³.

Ein solcher Auftritt ist sicherlich nichts, was im Existenzgründerseminar der Industrie- und Handelskammer gelehrt wird. Wenn Abovitz damit aber bezweckt hatte, Aufmerksamkeit zu erhalten, so ist ihm das unbestritten gelungen. Obgleich er über diesen

⁷²Von Alex North geschrieben für „2001: Odyssee im Weltraum“ ein Film aus dem Jahre 1968 nach dem Drehbuch von Stanley Kubrick und Arthur C. Clarke.

⁷³Im Original „A few awkward steps for me, a magic leap for mankind.“ [116, 117].



Abb. 5.10 Google Glass – Vorderansicht, Tim Reckmann (2014) Wikimedia Commons

Satz hinaus wenig Gehaltvolles mitgeteilt hatte, haben verschiedenen Investoren⁷⁴ bereits mehr als zwei Milliarden Dollar in das Unternehmen investiert. Der Clou von „Magic Leaps“ erst 2018 vorgestellten Datenbrille ist das Display, das im Gegensatz zu der Oculus-Brille transparent ist und so den Blick auf die Umgebung nicht verschließt. Damit ist die Realität nicht vollständig virtuell, sondern um den virtuellen Anteil erweitert. Diese „augmented Reality“ Brillen waren vorher allerdings schon durch die verfügbaren Datenbrillen „Google Glass“ und „Microsoft Hololens“ in ähnlicher Art bekannt. Das „Google Glass“ ist genaugenommen keine Brille, sondern ein Gestell, das ein Prisma vor dem Auge hält (Abb. 5.10). Über dieses Prisma werden mit einem kleinen Projektor die Bilder eines kleinen Displays direkt in das Auge des Trägers eingespiegelt.

Die „Hololens“ ist wie die „Magic Leap One“ eine echte Brille. Die Grundfunktion ist bei beiden Systemen ungefähr die gleiche. Vor dem Auge sitzt nicht mehr wie bei Oculus und Co. direkt das Display, sondern ein Lichtleiter. Dieser Lichtleiter ist aber keine einfache Platte, sondern ein Wellenleiter mit einem etwas komplizierterem Aufbau. Grundsätzlich haben diese Wellenleiter den entscheidenden Vorteil, wie ein Brillenglas vor dem Auge angebracht werden zu können. Das Bild wird an einer Seite, Ecke oder Kante in den Wellenleiter eingekoppelt und direkt vor dem Auge wieder ausgekoppelt. Die bedeutenden Technologien waren in den letzten Jahren die „Surface Relief Gratings“ (SRG) und „Volume Bragg Gratings“ (VBG). Beide Technologien basieren auf dem Prinzip der Beugungsgitter.

Optische Gitter

Beugungsgitter sind keine neue Erfindung, sondern bereits seit Jahrhunderten bekannt. Der amerikanische Richter Hopkinson war ein vielseitig interessierter Mann. Eines Abends hatte er, aus welchem Grund auch immer, durch sein Taschentuch auf eine Straßenlaterne geblickt. Dabei fie-

⁷⁴U. a. Google, Qualcomm, Alibaba und Axel Springer.

len ihm schwarze Streifen auf, die er für die vergrößerten Fäden des Taschentuches hielt. Allerdings bewegten sich diese Streifen bei Bewegung des Tuches nicht mit, was Hopkinson überaus verwunderte. Er wandte sich 1785 mit seiner Beobachtung an Rittenhouse, der dazu eine Analyse durchführte. Rittenhouse baute zur experimentellen Überprüfung der Erscheinung ein Gitter aus Harren und konnte das Phänomen mit der Newtonschen Beugung erklären. Damit hatte Rittenhouse das Prinzip eines Beugungsgitters beschrieben [118]. Da das Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge unterschiedlich stark gebrochen wird, kann mit einem Gitter wie mit einem Prismen weiße Licht in seine Spektralfarben zerlegt werden. Diese Farbzersetzung beobachtete um 1820 auch Fraunhofer an dem von ihm verwendeten Fadengitter. Ebenso wie vorher bereits mit dem Prismen [119], konnte Fraunhofer die schwarzen Absorptionslinien im Sonnenlichtspektrum nun auch mit dem Fadengitter nachweisen [120].

Grundsätzlich muss eine geordnete Struktur nicht zweidimensional sein. Der französische Mineraloge Haüy hatte 1784 beim versehentlichen Zerbrechen einer Kalkspatkristalle bemerkt, dass die Bruchstücke eine glatte, regelmäßige Form aufwiesen. Dieser Beobachtung verpackte Haüy in eine geometrische Theorie der Kristallstruktur [121]. Aus dieser grundlegenden Geometrie entwickelte Bravais dann 1848 in ein ganzes System von im Raum verteilten Punkten. Aus einer einfachen Punktreihe entwickelte er ein zweidimensionales Netz. Legt man mehrere dieser Netze mit identischem Abstand übereinander, erhält man schließlich ein gleichmäßiges Raumgitter [122]. Diese Bravais-Gitter nutzte Laue, um nachzuweisen, dass auch Röntgenstrahlen⁷⁵ elektromagnetische Wellen sind⁷⁶. Im Jahre 1913 hatten die Braggs⁷⁷ die Reflexion von Röntgenstrahlen an verschiedenen Kristallen untersucht und mathematisch beschrieben [123]⁷⁸. Die Bragg-Reflexion verhält sich nun anders, als die bekannte Reflexion an einem Spiegel. Bei einem Spiegel gelten die Gesetze der geometrischen Optik, der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel. In der Braggschen Beugungsreflexion wird das Licht überhaupt nur dann reflektiert, wenn es in einem bestimmten Winkel⁷⁹. Diese Reflexion⁸⁰ kann beim Durchgang durch das Volumengitter genutzt werden, um einen Lichtstrahl abzulenken. Beim Auftreffen auf die Oberfläche wird das Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge reflektiert oder absorbiert.

Microsofts nutzt in der Hololens Nokias Idee eines strukturierten Wellenleiters („Surface Relief Grating“ SRG, s. z. B. [124]). Dazu sind an der Oberfläche einer Glasplatte winzige Strukturen eingraviert, die das auf die Glasplatte projizierte Bild an dieser Struktur beugt. Dadurch wird das Licht in einen Winkel abgelenkt, der größer ist, als der Grenzwinkel der Totalreflexion (s. Abb. 5.11). Die Glasplatte wird damit zum Wellenleiter (Waveguide). An der Position des Betrachters (in Abb. 5.11 durch das Auge illustriert) ist

⁷⁵Entdeckt 1895 von Röntgen, der dafür 1901 den allerersten Nobelpreis für Physik erhielt.

⁷⁶Das Kristallgitter müsste dann wie ein optisches Gitter wirken und die Röntgenstrahlen zur Interferenz zwingen; so war es auch und Laue erhielt 1914 dafür den Nobelpreis.

⁷⁷Die Physiker William Henry Bragg und William Lawrence Bragg, Vater und Sohn, erhielten für ihre Entdeckung 1915 gemeinsam den Nobelpreis.

⁷⁸Auf Basis von Laues Nachweis.

⁷⁹Dem Glanzwinkel („glancing angle“ aus [123], S. 436).

⁸⁰Wobei es sich hierbei nicht wirklich um eine Reflexion, sondern um konstruktive bzw. destruktive Interferenz (etwa Resonanz und Absorption) handelt.

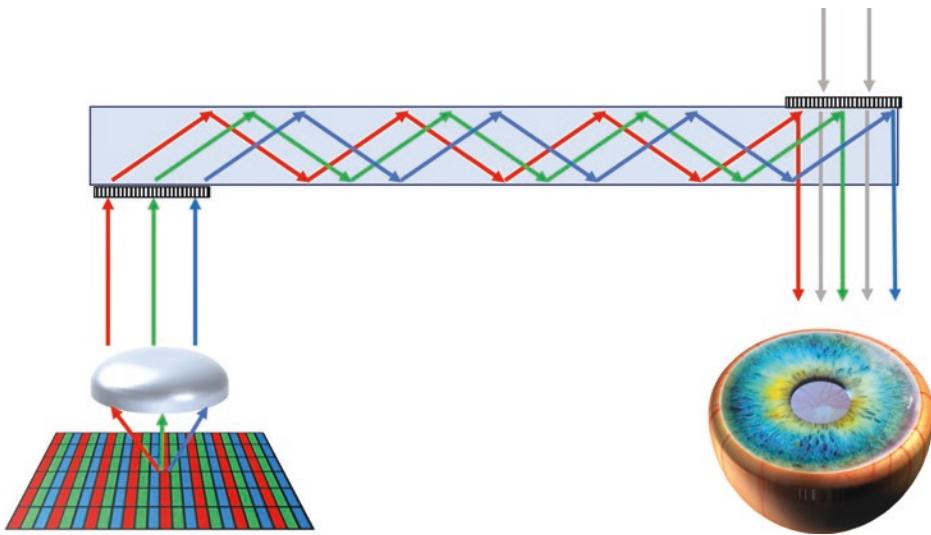


Abb. 5.11 Wellenleiter mit Beugungsgitter, Grasnick (2019)

ein weiteres Beugungsgitter installiert, das die eingekoppelten Lichtstrahlen durch Beugung wieder auskoppelt. Das von außen kommende Licht (graue Pfeile) kann dabei das Gitter passieren, sodass der Betrachter Bild und Umgebung gleichzeitig sehen kann. Das virtuelle Bild überlagert die reale Welt.

Dem aufmerksamen Betrachter wird nicht entgangen sein, dass in der Abb. 5.11 die unterschiedlichen Beugungswinkel für verschiedene Wellenlängen der Einfachheit halber nicht eingezeichnet sind. Langwelliges rotes Licht wird stärker gebuchtigt, als kurzwelliges blaues, weshalb mitunter mehrere Gitter⁸¹ oder mehrere Glasplatten⁸² verwendet werden.

Magic Leap nennt seine Technologie „Photonic Lightfield Chip“ und hat zu seiner Technologie einige Patente angemeldet⁸³. Welche der vielfältigen darin beschriebenen Varianten nun genau eingesetzt wird, ist nicht bekannt. Aus den verschiedenen Patenten lässt sich aber herleiten, dass der „Chip“ in Wirklichkeit ein passives optisches Element sein wird, der ähnlich wie der Lichtleiter der HoloLens funktionieren sollte. Der Unterschied liegt wahrscheinlich in der Nutzung mehrerer Ebenen des Lichtleiters, wodurch

⁸¹Nokia nutzt z. B. ein weiteres Gitter, um die Beugungsrichtung wiederum zu ändern, damit die Richtung der eingekoppelten und ausgekoppelten Strahlen identisch bleibt [125].

⁸²Als unterschiedliche Ebenen (Layer) zur wellenlängenabhängigen Ein- und Auskopplung des Lichtes, in Abb. 5.11 nicht dargestellt.

⁸³U. a. eine sehr umfangreiche Patentanmeldung mit verschiedenen Konfigurationen zur Nutzung von Virtual- und Augmented Reality mit unglaublichen 490 Seiten [126]. Scheinbar ist die Blockade zukünftiger Konkurrenten ein wichtiger Bestandteil der Unternehmensstrategie.

eben auch mehrere Fokusebenen möglich sind. Auf die Technik könnte die Übernahme der Nanoprint-Firma „Molekular Imprints“ 2015 [127] sowie ein Patent zur Nutzung von Beugungsgittern und Zonenplatten [128] hindeuten.

Beide Brillen erfüllen die grundlegende Erwartung an ein System mit überlagelter Realität. Die Überlagerung der durch die Brille gesehenen Umgebung mit den virtuellen 3D-Objekten gelingt. Im Test wird aber deutlich, dass besonders das geringe Sichtfeld und der schwache Kontrast problematisch ist. Das Netzpiloten-Magazin kommt zu der Einschätzung „Die Marktreife ist noch nicht in Sicht“ [129] und die c't bemängelt trotz Wow-Effekt das enge Sichtfeld [130].

Auch die jahrelang angekündigte, mit revolutionären Eigenschaften angepriesene „Magic Leap One“ schafft den magischen Sprung nicht. Das Sichtfeld ist bei dieser Brille fast ebenso eingeengt wie bei der „Hololens“, die Berechnung der virtuellen Realität ist mitunter fehlerhaft und zudem existieren kaum Inhalte oder Anwendungen. So urteilen einige Tester des Systems ernüchtert „Für 2 Mrd. US\$ hätten wir mehr erwartet“ (golem.de [131]), „Die Brille von Magic Leap, die den magischen Sprung digitaler Inhalte in die Wirklichkeit ermöglichen soll, scheitert bisweilen noch an der Technik.“ (PC Games Hardware [132]) urteilen die „leider blieb die erhoffte Revolution der Hardware aus und die Technologie ist noch nicht wirklich reif für Konsumenten.“ (VR-Nerds [133]).

„Hololens“ und „Magic Leap One“ sind aufgrund des komplizierten Aufbaus zudem recht teuer⁸⁴.

Um das Virtual-Reality-Set noch einigermaßen preiswert anbieten zu können, setzen einige Hersteller⁸⁵ deshalb auf die Nutzung von Smartphones. Dadurch spart man sich nicht nur das Display, sondern erhält kostenlos noch einen weiteren Vorteil. In den aktuellen Geräten sind auch die notwendigen Lage- und Bewegungssensoren schon eingebaut.

Mit dem Headset wäre das Virtual-Reality-Set eigentlich komplett. Aber man muss bedenken, dass zu jedem Hardwareset auch die Interaktion mit der zugehörigen Applikation gehört. Für eine einfache Interaktion mit dem 3D-Objekt⁸⁶ reicht eine 3D-Maus, die einen der beschriebenen 3D-Sensoren und die notwendigen Knöpfe und Tasten zur Bedienung aufweist. Das kann ein Stift sein⁸⁷, ein in der Hand gehaltener

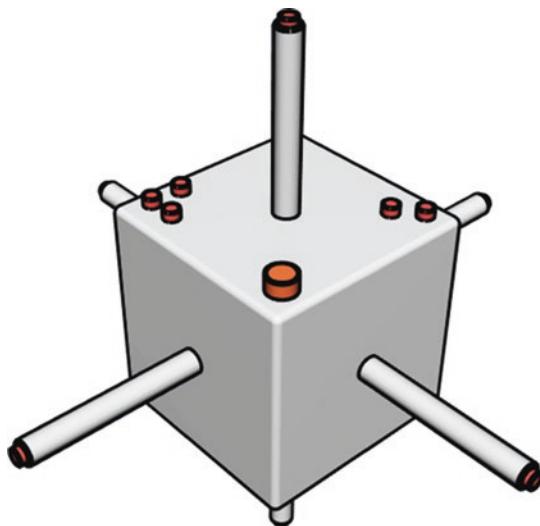
⁸⁴Die Preise lagen 2019 für die Microsoft Hololens bei 3500 US\$ und für das Magic Leap Personal Bundle bei ca. 2300 US\$.

⁸⁵Z. B. Samsung Gear, Zeiss One, LG 360 VR oder -als preiswerte Papp-Variante- Google Cardboard.

⁸⁶Z. B. Drehen, Verschieben, Zoomen.

⁸⁷In Analogie zum Lightpen oder Lincoln Wand.

Abb. 5.12 Cubic Mouse,
Hannes Grasnick (2019),
Illustration nach [134]



Trackball⁸⁸ oder ein etwas abgefahrenes Gerät, wie die Cubic Mouse vom GMD⁸⁹. Der Informatiker Fröhlich hatte dort ein Gerät entwickelt, das durch Drehen des Würfels und Ziehen an den Achsen eine überaus definierte Bewegung im virtuellen Raum durchführen konnte [134] (s. Abb. 5.12).

Ein solches Gerät weist auf die Notwendigkeit hin, für spezielle Anforderungen auch spezielle Eingabegeräte zu entwickeln. Es ist offensichtlich, dass sich für ein virtuelles Schießtraining eine Datenflinte oder ein anderes waffenähnliches Gerät zur Dateneingabe vorzüglich eignen wird. Ein Radfahrer wird einen Fahrradsimulator bevorzugen, der Läufer dagegen ein Laufband. Derartige Tretmühlen⁹⁰ treten in Interaktion mit der virtuellen Welt, erzeugen echte Anstrengung und liefern bei einer gut gestalteten virtuellen Umgebung gewiss einen sehr realistischen Eindruck vom virtuellen Geschehen.

Zusätzlich zu den vorgenannten Interaktionsmöglichkeiten kann auf den Nutzer auch eine zusätzliche äußere Struktur einwirken und dadurch Kräfte übertragen. Ein naheliegender Einsatzfall ist die Verstärkung der eigenen Kraft durch ein äußeres

⁸⁸Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wurde das dort entwickelte Eingabegerät „SpaceMouse“ genannt.

⁸⁹Das GMD-Forschungszentrum Informationstechnik war ein deutsches Großforschungszentrum in Sankt Augustin mit Schwerpunkt Mathematik und Informatik, heute aufgeteilt auf 8 Institute der Fraunhofer-Gesellschaft.

⁹⁰Im Englischen wir das Wort „Treadmill“ ebenso für eine historische Tretmühle, wie für ein modernes Laufband verwendet; im Prinzip für alles, bei dem man sich bewegt und nicht vom Platz kommt.

Metallskelett⁹¹, welches mit Servomotoren die Bewegung des Trägers unterstützt. Ein frühes Beispiel dafür sind der „Handyman“ und der „Hardiman“, zwei von dem General-Electric-Ingenieur Mosher⁹² entwickelte Exoskelette. Der Handyman war ein zweiariges Master-Slave-Gerät⁹³, mit dem ein entfernter Benutzer Arbeiten an einem gefährlichen Ort ausführen konnte⁹⁴. Dies reflektiert die Funktion von Waldos Handschuh und stellt eine nützliche Form der Telepräsenz dar. Der „Hardiman“ genannte Exoskelett-Manipulator war ein vollständiger Anzug, in dem ein Operator steckte, der in diesem Anzug etwa 700 kg⁹⁵ schwere Lasten heben konnte [135]. Obgleich der Prototyp nicht vollständig bedienbar war (s. Final Report [136]), war es doch eine große Idee hin zu einer Erweiterung der menschlichen Fähigkeiten⁹⁶. Eine praktische Umsetzung findet sich in diesen Tagen. Der Roboteranzug HAL⁹⁷ wurde von dem japanischen Wissenschaftler Sankai an der Universität von Tsukuba zunächst entwickelt, um den Signalfluss der bioelektrischen Signale des Körpers zu verstehen und den Träger bei schwerer Arbeit zu entlasten. Heute werden damit auch Patienten mit Rückenmarksverletzungen oder nach einem Schlaganfall bei der Rehabilitation zu unterstützen [137]. Der heutige Anzug HAL-5 ist nicht nur ein Datenanzug der die Positionen der Gliedmaßen aufzeichnet, ein HAL setzt auch die bioelektrischen Signale des Körpers in Bewegungsmuster um. Aus dem Gedanken an das Gehen wird ein wirklicher Schritt, da die Servomotoren des Anzugs die Bewegung des Körpers anstelle der Muskeln ausführen. Auch in diesem Fall kann der HAL genutzt werden, um schwere Lasten zu heben [138]. Der Roboteranzug wird vom Sankais Unternehmen „Cyberdyne“ [139] hergestellt und ist auch in Deutschland verfügbar.

Man kann sich durchaus vorstellen, dass die Servomotoren des HAL nicht von den Gedanken des Trägers gesteuert werden, sondern von einem externen Programm. Das Programm wiederum konnte von den Bewegungen des Trägers in einem virtuellen Raum gesteuert sein und so situationsabhängig reagieren. Beim virtuellen Bergauflaufen könnte der Anzug die Bewegung der Beinmotoren ein wenig blockieren, sodass es nicht nur virtuell, sondern auch real schweißtreibend wäre. Ein virtuelles Armdrücken wäre genauso anstrengend, wie ein reales.

⁹¹Exoskelett, von griech. exo = außen + Skelett.

⁹²Mosher hatte vorher bereits den „Walking Truck“ entwickelt, ein vierfüßiges Gerät von über einer Tonne Gewicht, das mit Schrittgeschwindigkeit über unwegsames Gelände marschieren konnte [135].

⁹³Die Bezeichnung „Gebieter-Sklave“ bezieht sich auf die Form der Steuerung: Ein einzelner „Gebieter“ steuert einen oder mehrere „Sklaven“, die dessen Anweisungen ausführen; umgekehrt kann der Sklave nicht die Steuerung übernehmen.

⁹⁴Geplant war der Einsatz bei der Verarbeitung radioaktiver Materialien (s. [135], S. 3).

⁹⁵1500 lb.

⁹⁶Im Titel des Berichts bezeichnet als „Machine Augmentation of Human Strength and Endurance“ (Maschinelle Steigerung der menschlichen Kraft und Ausdauer).

⁹⁷„Hybrid Assistive Limb“, etwa hybrid unterstützende Gliedmaßen.

Es muss allerdings nicht immer ein ganzer Anzug sein. In Sutherlands Idee vom ultimativen Display kommt auch ein virtueller Stuhl vor, auf dem man real sitzen kann. Tatsächlich wurde am Institut für Robotik und Intelligente Systeme der ETH Zürich ein mechatronisches Gerät entwickelt, das Sutherlands Vision recht nahekommt [140]. Der „stuhllose Stuhl“⁹⁸, der nach dieser Idee von einem Schweizer Start-Up namens „Noonee“ hergestellt wird, ist prinzipiell ein Exoskelett. Das Skelett ist aber so konstruiert, dass man beim Hinsetzen den realen Support eines Stuhles hat. Denkt man sich jetzt noch eine elektronische Auslösung der Stuhlfunktionalität hinzu, hätte man Sutherlands Traum -zumindest in diesem Punkt erfüllt.

5.4 Reale Virtualität

Vom Virtuellen in die Realität

► **Das sich selbst replizierende, interstellare Raumschiff „Oumuamua“**

Als der Asteroid „1I/2017 U1⁹⁹“ im Jahre 2017 aus den Tiefen des Weltraums an der Erde vorbeiflog¹⁰⁰, erregte zunächst nur seine interstellare Herkunft das Interesse der Entdecker. Immerhin war dieser Asteroid das erste beobachtete Objekt überhaupt, das definitiv von außerhalb unseres Sonnensystems kam. Für den kosmischen Brockens wurde kurz nach der Entdeckung ein Längen/Seitenverhältnis von 1/10 bestimmt [142], eine ungewöhnliche, langgestreckte Form, die kein anders bekanntes Objekt im Sonnensystem aufweist. Dieser fliegende Zylinder¹⁰¹ mit etwa 200 m Durchmesser hat damit eine Form, wie sie seit Jahrzehnten immer wieder von Science-Fiction-Autoren¹⁰² beschrieben wurde. In der Veröffentlichung im Wissenschaftsmagazin „Nature“ wird in der Zusammenfassung noch dazu auf einen Fantasie-Roman von Arthur C. Clarke hingewiesen¹⁰³. Dies hat dazu geführt, dass in der Presse die Vermutung auftauchte, das Objekt wäre ein künstlicher Körper, ja vielleicht sogar eine Art Alien-Raumschiff (z. B. [145, 146, 147]). Teilweise wurde dabei die Story um die Idee eines sich selbst replizierende Raumschiffes, einer sogenannten Von-Neumann-Sonde, erweitert ([148, 149]). Eine Von-Neumann-Sonde ist ein

⁹⁸ „chairless chair“ (s. [141]).

⁹⁹ Durch das Pan-STARRS-Teleskop auf Hawaii entdeckt (Pan-STARRS = Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System).

¹⁰⁰ In ca. 24 Mio. km Entfernung.

¹⁰¹ In der Presse gern auch als Zigarre bezeichnet.

¹⁰² Auch in mehreren Ausgaben der Perry-Rhodan-Reihe (z. B. [143, 144]).

¹⁰³ „Science fiction readers will remember Rendezvous with Rama by Arthur C. Clarke, where a cylindrical spacecraft from outside the Solar System passes through it at high speed“ [142].

sich selbst reproduzierendes Systeme, das analog zu der von Neumann aufgestellten Theorie der sich selbst produzierenden Automaten funktioniert [150].

Diese Sonde würde also Kopien von sich selbst herstellen können, die wiederum zu weiteren Selbstkopien in der Lage wären. Diese Tochtersonden könnten nun in eine andere Richtung aufbrechen als die Muttersonde und sich auf der Reise irgendwann wieder replizieren. Im Prinzip kann so mit jeder Replikation ein neuer Weg beschritten und dadurch ein größerer Teil des Universums erforscht werden.

Tatsächlich wurde der Asteroid, nunmehr unter dem hawaiianischen Namen „Oumuamua¹⁰⁴“, während des Vorbeifluges von der „Breakthrough Listen Initiative“ mittels des gewaltigen Green-Bank-Radio-Teleskops¹⁰⁵ belauscht [152]. Ein Hinweis auf Außerirdische Intelligenz wurde allerdings nicht gefunden¹⁰⁶.

Das Eingangsstatement im Untertitel soll eine Illustration für das sein, was im Kleinen heute bereits möglich ist. Aus einer Idee, einer Fiktion oder aus einem Bauplan kann ein reales Objekt entstehen. Es ist nicht zwingend, dass virtuelle Objekte immer nur scheinbar existieren. Neue Technologien ermöglichen den Übergang in die reale Welt.

Seit der Antike wurden die Vorstellungen der Künstler als Bilder oder Plastiken aus der Gedankenwelt in echte Werke übertragen. Aus dem virtuellen Gebilde wurde so ein reales Ding, etwas, was man durchaus auch als „reale Virtualität“ bezeichnen kann. Der Name soll beschreiben, dass in diesem Fall das reale Objekt eine Kopie der virtuellen Welt ist.

Sieht man von den rein handwerklichen Umsetzungen der Ideen durch die Künstler ab, so findet sich ein gleichartiger Prozess auch in der Fertigung von Alltagsgegenständen. Der erste Faustkeil entstand zuerst in der Vorstellung des Urmenschen, der ihn dann in als reales Objekt aus Stein fertigte. Eine Keramik existierte erst dann, wenn die Idee in Form und Farbe durch den Töpfer umgewandelt war. Es gab in der Geschichte der Menschheit immer wieder neue Dinge, die nicht auf der Kopie des Vorherigen beruhten, sondern nach den Ideen Einzelner entstanden. Dieser kreative Prozess war für die Fertigung des Gebrauchsgegenstandes nicht mehr nötig. Wenn der Gegenstand vorhanden war oder dessen Fertigung beschrieben werden konnte, waren auch andere als der Kreative in der Lage, eine Kopie anzufertigen.

Das blieb für Jahrtausende der einzige Weg, um reale Dinge herzustellen. Mit der zunehmenden Mechanisierung der Arbeitswelt und die daraus resultierende Kenntnis mechanischer Abläufe, konnten schon im Mittelalter komplizierte Geräte konstruiert werden.

¹⁰⁴Der Name ist zusammengesetzt aus ‘ou (Kundschafter oder Späher) und mua (der Allererste, Bote), das zweite mua betont und verstärkt lediglich die Bedeutung des ersten mua [151].

¹⁰⁵Ca. 100 m Durchmesser.

¹⁰⁶„No evidence of artificial signals...“ [153].

Die Geschichte des Pygmalions hatte immer wieder Künstler und Gelehrte motiviert, es diesem Bildhauer gleichzutun und menschenähnliche Gebilde zu erschaffen. Dem Dominikaner Albertus Magnus wird nachgesagt, dieses Ziel zumindest teilweise erreicht zu haben. Er soll eine redende Maschine von Metall¹⁰⁷ angefertigt haben, die ihm sein Schüler Thomas von Aquino aus Angst zerschlug (nach [155] S. 500). Ob oder wie das Gerät tatsächlich funktioniert haben könnte, ist nicht überliefert.

Der Heidelberger Baumeister de Caus hatte 1615 allerlei Apparaturen beschrieben, die auf Basis von mechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Kraftübertragungen funktionierten [156]. Mittels der Wasserkraft konnte er Uhren antreiben und Fontänen erzeugen, aber auch bewegte Figuren erschaffen, die den Vogelsang nachahmten¹⁰⁸ oder scheinbar tranken¹⁰⁹. De Caus entwarf ganze Szenerien, bei denen sich die Figuren wie von Geisterhand bewegten und Melodien erklangen. Ein Beispiel ist einer Szene, bei der eine Nymphe in einem von Delphinen gezogenem Boot an einem musizierenden Zyklopen vorbeifährt (Abb. 5.13).

Das ist nun in der Tat etwas, was in der Wirklichkeit nie existierte, aber durch den Künstler für den Betrachter real wurde. Die Ingenieurskunst von de Caus beschränkte sich aber nicht auf Wasserspiele im Heidelberger Pfälzischen Garten. De Caus erfand darüber hinaus recht nützliche Maschinen wie Wasserpumpen, Drehorgeln, Säge- und sogar Drehmaschinen – für die damalige Zeit eine herausragende Leistung.

Derartige kunstfertige Apparaturen wurden im Laufe der Zeit immer wieder gebaut, wobei man sich dabei im Wesentlichen auf die Kunst der Nachahmung der Realität fixierte¹¹⁰.

Der Philosoph Descartes hatte eine mechanistische Anschauung des Lebens und sah so konsequenterweise die Tiere nur als komplizierte Maschinen. In seiner Betrachtung über die Natur der menschlichen Seele¹¹¹ sinniert er auch über die Möglichkeit, dass die Menschen nur bloße Automaten wären ([158], S. 36).

„.... allein ich hatte schon oft von meinem Fenster Menschen auf der Strasse vorübergehen sehen, von denen ich ... zu sagen pflegte, dass ich sie selbst sähe. Aber was hatte ich gesehen, ausser Hüte und Kleider, unter denen Automaten stecken konnten, die ich aber für Menschen hielt?“

¹⁰⁷Bzw. ein Bildsäule ([154], S. 164).

¹⁰⁸„Wie durch Wasser und Wind allerhandt Vogelsang zu machen“ (aus den „Gewalt samen bewegungen“ [156], Erstes Buch).

¹⁰⁹„Wie zu diesem ein Schwan oder sonst ein Vogel zu thun, welcher alles das Wasser so ihm vor gehalten, außtrincket“ (ebenda).

¹¹⁰Beispielhaft seien hier die Automaten der Schweizer Uhrmacher-Familie Jaquet-Droz genannt, die besonders mit den drei „Androiden“, dem Schreiber, dem Zeichner und die Musikerin, das Publikum verblüfften. Der Schreiber schrieb wirkliche Texte von bis zu vierzig Zeichen, der Zeichner konnte vier unterschiedliche Bilder malen und die Musikerin spielte auf ihrer kleinen Pfeifenorgel ein Repertoire von fünf Melodien [157].

¹¹¹Zweite Abtheilung, Untersuchungen über die Grundlagen der Philosophie [158].

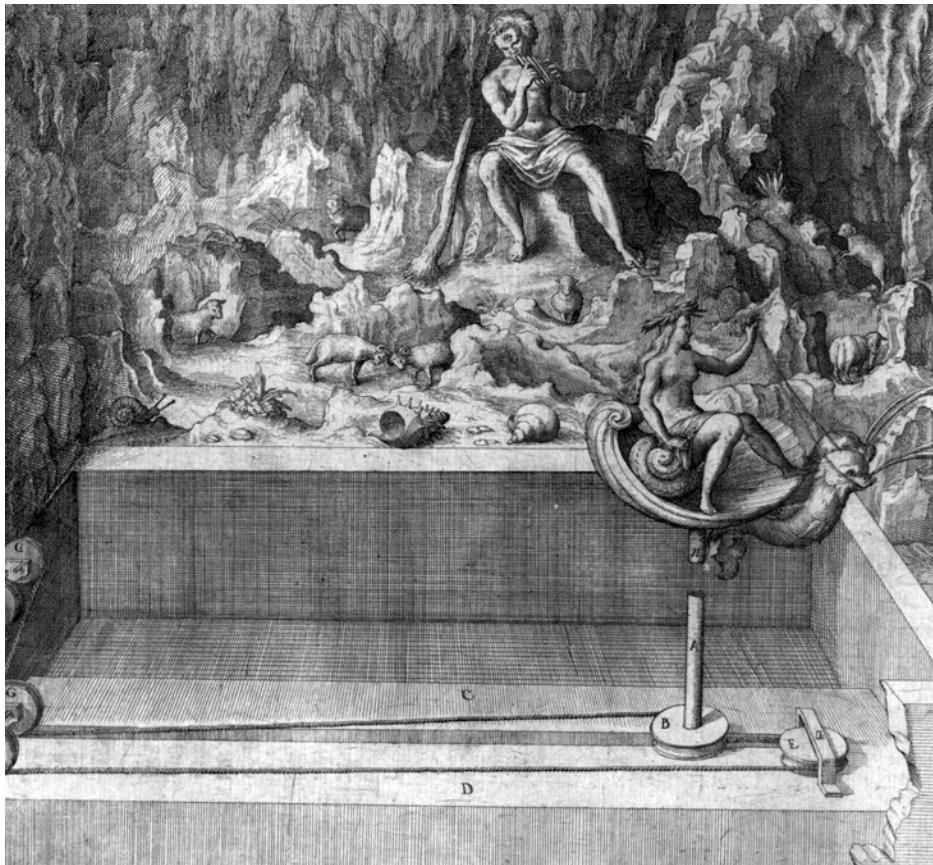


Abb. 5.13 Maschine für Galatea mit Delphinen und Schalmei spielenden Zyklopen, Salomon des Caus (1615) aus [156]

Descartes löst sich von der, für damalige Zeiten „unchristlichen“ Vorstellung einer Gleichstellung von Mensch und Tier, indem er den Tieren rundheraus die Seele und Vernunft absprach, was sich besonders in der fehlenden Sprache manifestierte¹¹².

¹¹² „Während die Vernunft ein allgemeines Instrument ist, das auf alle Arten von Erregungen sich äussern kann, bedürfen diese Organe für jede besondere Handlung auch eine besondere Vorrichtung, und deshalb ist es moralisch unmöglich, dass es deren so viele in einer Maschine giebt, um in allen Vorkommnissen des Lebens so zu handeln, wie wir es durch die Vernunft können. Durch diese Mittel kann man auch den Unterschied zwischen Mensch und Thier erkennen. Denn es ist sehr merkwürdig, dass selbst der stumpfsinnigste und dümmste Mensch, ja sogar die Verrückten einzelne Worte verbinden und daraus eine Rede herstellen können, wodurch sie ihre Gedanken mittheilen, während selbst das vollkommenste und besterzeugte Thier dies nicht vermag.“ (aus „Die Thiere haben keine Seele“ in [158]).

Zu Descartes Lebzeiten waren de Caus Maschinen das komplizierteste, was sich an Automaten herstellen ließ. Es ist unbestritten, dass dieser seine Zeitgenossen an technischer Fertigkeit überragte, dennoch wird kaum jemand eine seiner Apparaturen für echte Lebewesen gehalten haben.

Das änderte sich jedoch, als der Franzose Vaucanson seine erstaunlichen Automaten vorführte [159]. Sein mechanischer Flötenspieler war durchaus geeignet, die Mitglieder der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu beeindrucken. Der Spieler konnte zwanzig verschiedene Stücke auf einer Provence-Pfeife (einer Flöte) spielen und war von der Qualität zumindest so gut, dass sich sogar der renommierte Flötist Quantz¹¹³ mit dem Spiel beschäftigte. Die Musik wurde dabei nicht live eingespielt, sondern auf einer Walze über verschieden, in die Walze hingesteckte Bleche „programmiert“. So konnten prinzipiell auch rein virtuelle Stücke gespielt werden, die kein Komponist vorher jemals aufgeschrieben hatte.

So beeindruckend schon der lebensgroße Flötenspieler Vaucansons war, sein kleineres Werk war es noch viel mehr. Vaucanson hatte eine mechanische Ente erschaffen „die all dasjenige verrichtet, was eine lebendige Ente thun kann“ [160]. Die Ente konnte mit den Flügeln schlagen und schnattern, essen und trinken und sogar die Nahrung verdauen und wieder ausscheiden. Diese überaus realistische Nachahmung einer realen Ente war durchaus angetan, den Zeitgenossen Vaucansons die Vision einer Automatenwelt zu vermitteln¹¹⁴ (Abb. 5.14).

Tatsächlich hatte sich die Welt im 18. und 19. Jahrhundert zunehmend mechanisiert und aus den Automaten zur Unterhaltung wurden nützliche Maschinen. Vaucanson, der auch Inspekteur der französischen Seidenmanufakturen war, hatte einen automatischen Webstuhl erfunden. Sein Webstuhl basierte wie der flötende Android auf der Programmierung durch eine drehende Walze. Jedoch wurden hier keine Bleche eingesetzt, sondern verschiedene Löcher in eine Pappe gestanzt und dies um die Walze gewickelt. Das Abtasten dieser Löcher durch Nadeln ergab die Programmierung des Musters [162]. Obgleich der Webautomat Vaucansons nicht erfolgreich war, waren die programmierbaren Webstühle eine echte Revolution und eine Ursache des aufsteigenden Unmutes der Weber. Das lag vor allem daran, dass man seit der Einführung der programmierbaren Webstühle einfach weniger Personal zur Bedienung benötigte und preiswerte Fabrikware (auf Basis von „Webautomaten“) die heimischen Webstühle verdrängte, was zur Verarmung der Weber und in der Folge zu den Weberaufständen führte. Die Idee der Lochkartensteuerung, die besonders mit dem Jacquard-Webstuhl bekannt wurde, verbreitete

¹¹³Johann Quantz, der Flötenlehrer Friedrich des Großen, kritisierte allerdings auch die Art des mechanischen Spiels, da die hohen Töne durch die eingeschränkte Lippenbewegung des Spielers „rauh und unangenehm“ werden (aus seinem Lehrbuch „Versuch einer Anweisung die Flöte traversiere zu spielen“ von 1752 S. 46).

¹¹⁴Und wie Helmholtz bemerkte, ihnen den Wunsch nach einem Perpetuum mobile einzupflanzen ([161], S. 7).

Abb. 5.14 Vaucansons Automaten, Jacques de Vaucanson (1738) aus [160], Frontispiz



sich später auch außerhalb der Textilindustrie. Mit der Nutzung der Lochkarten in Babbages Rechenmaschine „Difference Engine“ (s. [163]), mit deren Entwicklung er in den 20er Jahren des 19. Jahrhunderts begonnen hatte [164], wurden die Lochkarten ein populäres Eingabesystem für die ersten Computer (z. B. beim Zuse Z3, dem der ersten programmierbaren Computer der Welt [165]).

Eine Webmaschine erzeugt ein flaches Muster, ein Computer gibt nur das Resultat der Berechnung aus. Die wirkliche Umsetzung der virtuellen Idee in ein dreidimensionales Gegenstück ist das noch nicht. Mit der Entwicklung der Fotografie entstanden jedoch auch fotografische Skulpturen.

Der französische Schriftsteller Gautier war bekanntermaßen ein Anhänger des Haschischkonsums¹¹⁵ und war insofern sicherlich ein Freund nicht realer Wahrnehmungen. Tatsächlich interessierte er sich für die moderne Technologie der Fotografie

¹¹⁵Mit dem Arzt Moreau Gründer des Klubs der Haschischesser, dem neben Gautier und auch Dumas, Balzac oder Flaubert angehörten, Gautier hat darüber eine Geschichte verfasst [166], Moreau eine wissenschaftliche Abhandlung [167].

und beschrieb in einem Aufsatz für den „Moniteur universel“ die Fotoskulptur, eine bis dahin unbekannte Form der Wiedergabe (aus [168], S. 4)¹¹⁶.

„Dass dieser uralte Traum, das flüchtige Bild auf dem Glas zu fixieren, verwirklicht worden wäre, war schon ganz wunderbar. Die Designersonne ! weiterzugeben; aber die Bildhauer-sonne ! Die verwirrte Phantasie weigert sich, ein solches Wunder zu glauben.“

Er beschreibt dann, kaum weniger blumig, die Aufnahme einer Person in einer Rotunde mit 24 Kameras gleichzeitig. Die Bilder werden in der Dunkelkammer des Monsieur Willème entwickelt und zu einer 3D-Skulptur zusammengesetzt. Das Prinzip basiert auf dem Nachzeichnen der Silhouette der Fotografien mit einem Pantograf. Der Pantograf ist ein einfaches mechanisches Gerät zum Übertragen von Zeichnungen mit unterschiedlichem Maßstab, der 1603 von Scheiner erfunden und beschrieben wurde [169]. Mithilfe des Pantografen entstand ein vergrößerter Schattenriss für jede Kameraposition. Schneidet man diese einzelnen Profile aus und setzt diese dann zu einem Zylinder zusammen, erhält man die 3D-Skulptur des Aufgenommenen [170]. Damit erzeugte Willème einen wirklichen Avatar der fotografierten Person, der dem realen Menschen verblüffend ähnlich sah (s. Abb. 5.15).

Im Hinduismus ist der Avatar die körperliche Manifestation eines Gottes, im heutigen Verständnis das virtuelle Pendant einer realen Person, in Gautiers Roman [171] eher vergleichbar mit dem seelentauschenden Jake Sully aus dem Film Avatar, der am Ende des Films zu seinem eigenem Avatar wird.

Die Willémesche Form der lebensechten Darstellung etablierte sich schnell in anderen Ländern. In Berlin waren es vor allem Pötschke [172] und später Selke [173], die um die Jahrhundertwende die Idee Willèmes verbesserten und mit ihrer Technik einige Bekanntheit erlangten. Pötschke optimierte Kantenschärfe der auszuschneidenden Silhouetten durch einen vertikalen Schirm vor der Lichtquelle. Die Trennungslinie zwischen Licht und Schatten auf dem Modell ergibt dann die Kontur der Silhouette [174]. Selke hatte sogar einen eigenen Photoskulpturapparat erfunden [175] und er hatte darüber hinaus ein Verfahren erdacht, mit dem die Form eines Objektes aus Stereobildern durch den Vergleich korrespondierender Punkte ermittelt werden konnte [173]. Selke hatte auch den Chronofotografen Anschütz „fotoskulptiert“ [176], sodass Anschütz dreidimensional überliefert ist.

Diese Skulpturen erinnern nicht von ungefähr an die Fertigung heutiger lebensechter Kopien. Auch in einem aktuellen Body-Scanner werden mitunter viele Kameras eingesetzt, um eine Kopie der Realität zu erstellen¹¹⁷.

¹¹⁶Eigene Übersetzung.

¹¹⁷Z. B. vom österreichischen Unternehmen 3Dcopysystems als „Big Alice“ mit 64 Kameras [177] oder von der deutschen osensus GmbH als „3D Scamera One+“ mit bis zu 125 Kameras.

Abb. 5.15 François Willème,
Selbstportrait, Photoskulptur,
(1865) George Eastman
House International Museum
of Photography and Film,
Rochester, NY, Collection G.
Cromer/276



Das ist aber nicht immer notwendig. Der ehemalige österreichische Offizier Blanther hatte 1890 die Idee, dreidimensionale Karten aus Schichtbildern anzufertigen. Dabei wurde eine Karte mit Höhenlinien mehrfach angefertigt, an der jeweiligen Höhenlinie ausgeschnitten und übereinander geklebt [178]. Es ist klar, dass hier nicht nur realistische Objekte anhand wirklicher Landstriche erstellt werden können, sondern das mit diesem Verfahren auch virtuelle Landschaften und Objekte erzeugt werden können.

Das Übereinanderlegen einzelner Schichten ist ein Grundprinzip des 3D-Drucks, aber auch für sich genommen ein Prozess, der in den 1990er Jahren wieder populär wurde¹¹⁸. Ein

¹¹⁸Als „Laminated Object Manufacturing“ (LOM) von der amerikanischen Firma „Helisys“ 1990 eingeführt und später besonders im industriellen Gussformenbau eingesetzt [179].

Vorteil ist die Möglichkeit, verschiedene Materialien wie Papier, Holz, Keramik und sogar Metall zu verarbeiten. Wenn das Material sehr dünn ist, kann es von der Rolle Schicht für Schicht übereinander geklebt und dabei mit Messer oder Laser geschnitten werden [180].

Diese heutige automatische Fertigungsmöglichkeit war im 19. Jahrhundert noch nicht verfügbar. Zudem war die Erzeugung der einzelnen Schichten eines Schichtbildes aus einem realen Objekt mit der damaligen Technik kaum möglich. Ab den 1930er Jahren existierte mit dem Verwischungstomographen „Introskop“¹¹⁹ ein Gerät, mit dem man Bilder des Inneren von Körpern erstellen konnte. In den 1960er Jahren wurden von dem Südafrikaner Cormack die theoretischen Grundlagen der Computertomografie¹²⁰ gelegt (s. [182, 183]) die Hounsfield in die Realität umsetzte [184]¹²¹. Das Resultat einer Computertomografie ist eine Vielzahl von Schattenbildern, die zu bestimmten Raumrichtungen gehören. Daraus ließe sich, analog zur Willèmeschen Technologie schon ein 3D-Objekt aus den äußeren Umrissen erstellen. Zur Rekonstruktion der Objekte bedient man sich heute mathematischer Verfahren¹²², um aus den Schattenbildern die bekannten Schnittbilder zu rekonstruieren. Diese könnte man dann wieder zu einem Blantherschen 3D-Objekt kombinieren.

Prinzipiell sind bei einem 3D-Druck die Objekte immer aus Schichtbildern aufgebaut, die nach und nach, Schicht für Schicht, von dem virtuellen 3D-Objekt in das reale Werkstück übertragen werden. Die Übertragung der Winkelschnitte Willèmes oder der Höhenschnitte Blanthers hatte aber jeweils den Nachteil eines starken manuellen Anteils. Auch wenn, wie in Willèmes Fotoskulpturen, die Originale fotografiert wurden, so war dennoch eine die Nachzeichnung der Bilder und deren Übertragung auf das die Winkelschnitte notwendig. Mit Beginn des 20. Jahrhunderts schlug der in Berlin ansässige italienische Ingenieur Baese eine wesentlich einfachere Möglichkeit vor, die ohne die manuelle Übertragung auskam. Baese beleuchtete das Original von beiden Seiten mit abgestuftem Licht [186]. Zuerst wurde eine Aufnahme mit gemacht, bei der die hinteren Objektteile (von der Kamera aus gesehen) am stärksten beleuchtet wurden, die vorderen Teile des Objektes nur schwach. Eine Aufnahme von vorn zeigt dann im Negativ eine Abbildung als Tiefeninformation. In der Abb. 5.16 ist in Abb. 1 und 2 (oben) die Beleuchtung dargestellt. Das Objekt wird mit dem Licht von der Seite beleuchtet (mit den Pfeilen dargestellt). Die Nummern der Pfeile repräsentieren die Lichtintensität:

¹¹⁹Der Name „Verwischungstomograph“ basiert auf der Funktion des Gerätes. Bei der Aufnahme werden Röntgenfilm (oder Sensor) und Röntgenröhre um das Objekt gedreht. Ein scharfes Bild entsteht so nur im Drehungsmittelpunkt, der Rest scheint „verwischt“ (s. [181], S. 9). Der Siemens-Name „Introskop“ ist eine Zusammensetzung von lat. intro-/intra- = hinein, nach innen + -skop von griech. skopein = betrachten.

¹²⁰Tomografie von griech. tome = Schnitt + graphein = schreiben.

¹²¹Allerdings in Unkenntnis von Cormacks Vorarbeiten.

¹²²Besonders der 1917 von Radon beschriebenen Transformation [185].

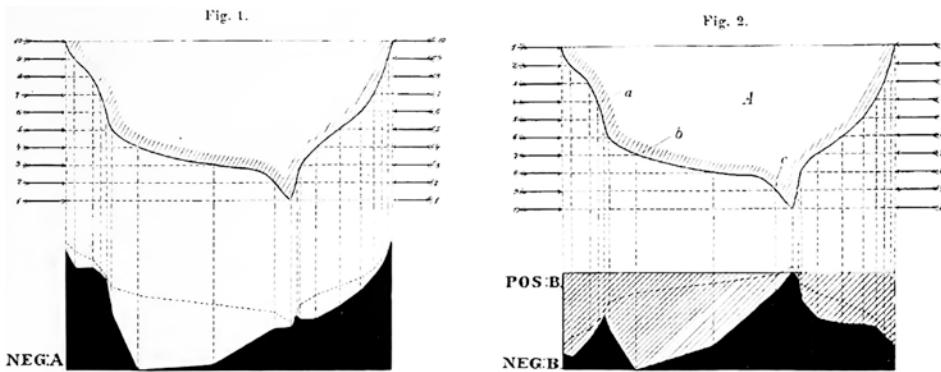


Abb. 5.16 echte Photoskulptur, Beleuchtung und Negative, Carlo Baese (1904) aus [187], S. 393 und 394

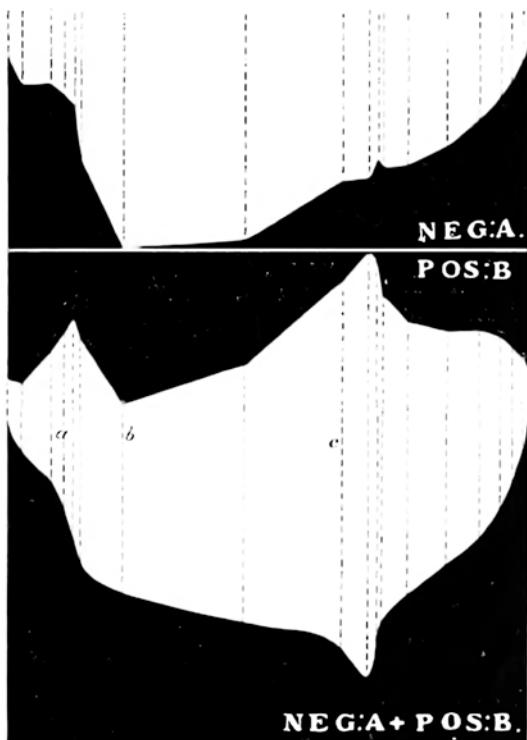
Stufe 10 ist das stärkste Licht, Stufe 1 das schwächste. Wie man sieht, ist in Fig. 2 die Beleuchtungssituation umgekehrt. Unter den Abbildungen des Objektes ist in Abb. 5.16 auch die zugehörige Schwärzung auf dem fotografischen Negativen dargestellt. Erwartungsgemäß ergibt sich eine größere Schwärzung bei stärkerer Beleuchtung.

Wie deutlich zu erkennen ist, gibt keines der beiden Negative die wahre Form des Objektes wieder. Aus dem Negativ B wird nun ein Positiv B hergestellt. In der Abb. 5.16 ist das in Fig. 2 als Schraffur (gekennzeichnet mit POS:B) über dem Negativ (NEG:B) illustriert. Es wird klar, was Baese damit bezweckt hatte, wenn man Negativ A und Positiv B übereinanderlegt. Das funktioniert natürlich nur, wenn beide Bilder auf Glasplatten aufgebracht werden, was zu Baeses Wirkzeiten ein üblicher Weg war. Überraschenderweise entspricht dann die resultierende Schwärzung der Kontur des Objektes. Durch die Umkehrung der Beleuchtung bei gleichzeitiger inverser Schwärzung im zweiten Bild ergibt sich die resultierende Schwärzung nur noch als Funktion der äußeren Kontur¹²³ (Abb. 5.17).

¹²³ „Alle Faktoren also, welche auf beide Aufnahmen in gleicher Weise einwirkten, zu denen auch die Wirkung der Farbe des Modells und selbst eventuelle Reflexe des Objektivs, Fehler im Kondensor etc. zu rechnen sind, sind durch die Kompensation vernichtet, um einzig und allein die Abstufung gelten zu lassen.“ (aus [187], S. 397).

Abb. 5.17 Bildüberlagerung als Tiefenbild, Carlo Baese (1904) aus [187], S. 395

Fig. 3.



Mit diesem neuen Negativ wird nun eine dicke Chrom- Gelatine-Schicht belichtet. Da die Quellfähigkeit der Gelatine von der Dauer der Belichtung abhängt¹²⁴, wird die Gelatineschicht in den stark belichteten Bereichen in Wasser weniger aufquellen, als in den weniger oder nicht belichteten. Daraus ließ sich nun endlich ein Relief z. B. mit Gips abformen. Da naturgemäß die Gelatineschicht nur eine geringe Höhe haben kann, muss eine echte Plastik wieder aus mehreren Schichten zusammengesetzt werden. Baese empfiehlt für die Hälfte einer Portraitbüste in halber Naturgröße vier Schichten ([187], S. 398), womit eine Schichtdicke von immerhin einigen Zentimetern notwendig wäre. Die Technik der fotografischen Relieferstellung erscheint durchaus vielversprechend, hat sich aber trotz eines Patentes von Baese [191] als Verfahren zur Herstellung von

¹²⁴Die Lichtempfindlichkeit von Chromgelatine und deren Eignung zur Relieffotografie war schon zum Ende des 19. Jhdts. bekannt (s. z. B. [188]) und wurde ganz allgemein den Lichtdruck benutzt [189], später wurde noch der Einfluss der Temperatur bemerkt und für feinere Reliefs benutzt [190]. Ganz allgemein eignen sich dafür lichtempfindlich gemachte Stoffe (hier durch Chromate), die im Gelzustand vorliegen (Eiweiß, Leime, Schellack oder Zelluloid).



Abb. 5.18 Tiefenbild nach Baese, Hannes Grasnick (2019), 3D-Modell von Three D Scans [192]

Skulpturen nicht durchgesetzt. Fotografische Reliefs wurden aber lange vorher und nachher als Lichtdruck¹²⁵ vor allem zur Realisierung kleiner Auflagen im Kunstdruck eingesetzt.

Es ist schwerlich aus den Skizzen Baeses auszumachen, ob sein Verfahren wirklich eine ausreichende Tiefenwirkung liefern konnte oder nicht. Daher wird hier der Test noch einmal mit modernen Mitteln wiederholt. Eine Photoskulptur Pötschkes¹²⁶, die den Dichter Goethe darstellt und als 3D-Scan vorliegt [192], wurde entsprechend der Anweisungen Baeses in einem 3D-Programm beleuchtet und die resultierenden Bilder überlagert (Abb. 5.18). In der Abbildung ist links die Beleuchtung vorne hell/hinten dunkel, in der Mitte vorne dunkel/hinten hell und ganz rechts die Überlagerung der beiden Bilder¹²⁷. Das Resultat zeigt in der Tat deutliche Eigenschaften eines Tiefenbildes. Die vorderen Bereiche sind hell, die weiter hinten liegenden dunkel.

Von Depth-Maps, Time-of-Flight und Streifenbildern

Der innovative Weg der Gewinnung einer Tiefenkarte von realen Objekten hatte zu Baeses Zeit außer der von ihm beschriebenen Photoskulptur keine praktischen Anwendungen. Heute ist die Erstellung von Tiefenkarten ein wichtiger Bereich bei der Erfassung des Raumes. Der übliche Weg ist dabei die Nutzung von Stereokameras. Aus der Unterschiedlichkeit des Stereobildpaars kann für die meisten Punkte des Stereobildes die horizontale Verschiebung (Disparität) bestimmt und daraus die Tiefenkarte errechnet werden.

Zur Registrierung eines Spielers in einem virtuellen Raum werden häufig „Time-of-Flight“-Kameras eingesetzt. Bekanntestes Beispiel für die Time-of-Flight Technologie ist der Microsoft-Kinect-Sensor [193]. Dabei wird die Szene mit einem Lichtimpuls beleuchtet und die Laufzeit des reflektierten Lichtes an jedem Bildpunkt bestimmt. Die Technik wurde zum dem Ende

¹²⁵Auch Collotypie (der Kolloide wegen), Heliogravüre (Gravur mit Sonnenlicht).

¹²⁶Deren Fertigung schon 1893 beschrieben wird (in [172], S. 497).

¹²⁷Von denen eines wie gefordert invertiert wurde, die Belichtung wurde ein wenig angepasst (so wie es auch Baese in seinem Fotolabor möglich gewesen wäre).

der 1970er Jahre entwickelt [194] und ist bei Ausstattung mit einem Laserscanner geeignet, auch Szenen mit Ausdehnungen von mehr als einem Kilometer in Millimetergenauigkeit zu erfassen [195]. Das Resultat ist eine Punktwolke, die einer Tiefenkarte aus der Messposition entspricht. Mit mehreren Messpositionen um das reale Objekt, kann aus mehreren Punktwolken das komplette 3D-Modell zusammengesetzt werden.

Wie Baese gezeigt hatte, kann ein Objekt durch geeignete Beleuchtung in seiner räumlichen Ausdehnung erfasst werden. Der Japaner Morioka hatte 1933 dazu noch einen besseren Einfall. Er projizierte eine Anzahl von Linien auf das Objekt, fotografierte diese und konnte anhand des Linienverlaufes eine Vielzahl von Schnittbildern erstellen, die er zu einer Kopie zusammensetzte [196]. Morioka hatte noch keine Notwendigkeit zur mathematischen Rekonstruktion der Objekte, sondern beschränkte sich auf die rein mechanische Umsetzung in Portraitskulpturen¹²⁸. Heute werden mittels Streifenprojektion mit Genauigkeiten von weniger als einem Millimeter komplett 3D-Objekte erfasst (s. z. B. [197])

Einer der Hauptgründe für den ausbleibenden kommerziellen Erfolg des Lichtreliefs war vermutlich die geringe Tiefe der 3D-Objekte, die weniger Skulptur, als Flachrelief mit geringem Stiacciato¹²⁹ waren.

Der Australier Monteath beanstandete in seinem Patent von 1922 die geringe Dicke, die sich ganz allgemein mit Gelatineplatten erzielen lassen [198]. Monteath schlug als Lösung zunächst eine Beleuchtung des Objektes ausschließlich von der Vorderseite vor und positionierte das aufzunehmende dafür in einer mit schwarzem Samt ausgeschlagenen Kammer. Die Lösung führt sicher nicht zu einer echten Abbildung der äußeren Form, sondern gibt durch die Beleuchtung die Kanten und Farben des Objektes wieder. Es wird in der Schrift deutlich, dass Monteath sich nur für Flachreliefs interessiert und sein Verfahren im Wesentlichen eine Optimierung der Herstellung der Gelanteneschicht ist. Sein Gießverfahren in einer Gussform kommt allerdings auch nur auf etwa drei Millimeter Schichtdicke.

Das ist für ein echtes 3D-Objekt zu gering. Erst 1951 gelingt dem amerikanischen Anwalt Munz die Herstellung größerer Formate. Sein „Photo-Glyph Recording¹³⁰“ genanntes Verfahren [199] ähnelt den Verfahren von Baese und Monteath insoweit, dass auch hier Reliefs von Schichtbildern erstellt werden. Entgegen des Prozesses von Baese müssen zu Herstellung größerer Skulpturen die einzelnen Schichten nicht mehr einzeln hergestellt und von Hand zusammengefügt werden. Bei Munz erledigt das der Photo-Glyph-Rekorder. In seiner Zeichnung aus der deutschen Patentschrift (Abb. 5.19) ist der Apparat abgebildet. Es ist im Prinzip ein großer Behälter, bei dem die Hebebühne höhenverstellbar ist. Auf diesen Hubtisch wird aus einem Vorratsbehälter eine

¹²⁸Moriokas Unternehmen „Rittaishashinzo“ hat auf dieser Basis bis 1990 mehr als 30.000 Skulpturen angefertigt, inklusive der Präsidenten Johnson, Ford Carter und Reagan.

¹²⁹Ein Flachrelief mit geringer Tiefe, wie es besonders Donatello anfertigte.

¹³⁰Eine Glyphe, griech. für etwas Eingeritztes, bezeichnet die grafische Darstellung eines Zeichens.

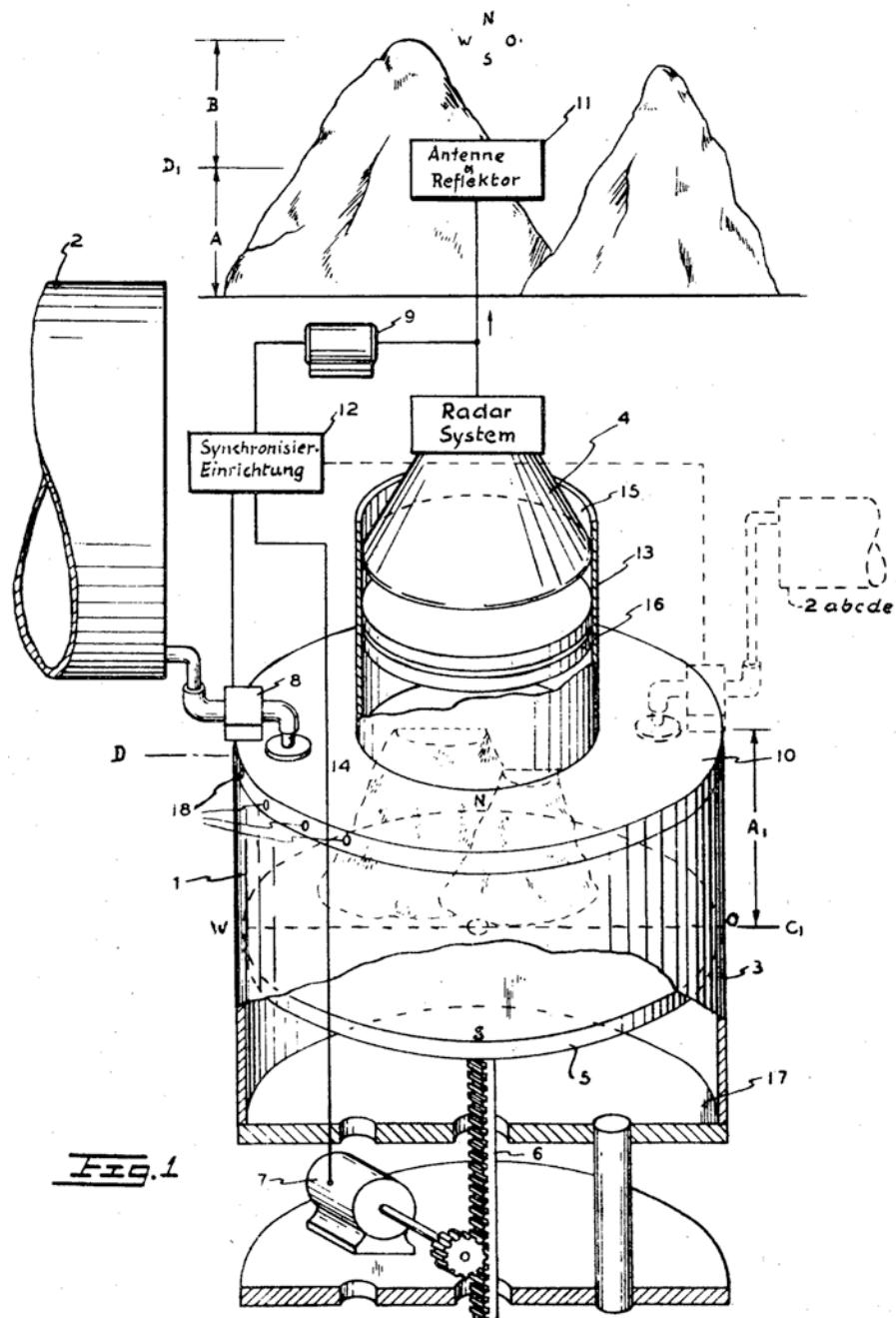


Abb. 5.19 Vorrichtung zur Herstellung von Photoreliefs, Otto John Munz (1956) aus [200]

dünnflüssige fotoempfindliche Schicht gegossen und von Lichtquelle beleuchtet. Diese Lichtquelle kann auch eine Kathodenstrahlröhre sein, die mittels eines Objektivs auf die Schicht fokussiert wird, sodass sich die dünne Schicht ganz ohne Negativ belichten lässt. Dann erfolgen die notwendigen fotochemischen Prozesse Entwickeln, Fixieren und Härt(en). Im Anschluss wird der Hubtisch um eine Schichtdicke gesenkt und die nächste Lage wird aufgetragen. Der Prozess wiederholt sich; Belichten, Entwickeln, Fixieren, Härt(en)...

Irgendwann ist die gewünschte Gesamtdicke erreicht und der Druckprozess beendet. Der letzte Schritt ist das Herauswaschen der unbelichteten Teile. Danach ist das 3D-Objekt fertig.

Der Prozess, den Munz hier beschreibt, ist dem der modernen Stereolithografie¹³¹ sehr ähnlich. Auch dort wird Schicht für Schicht ein fotosensitives Material belichtet.

Es scheint daher verwunderlich, dass Munz's Erfindung auf geringe Resonanz stieß. Der Grund liegt hier wahrscheinlich im Fehlen der 3D-Objekte, die sich überhaupt für einen 3D-Druck eigneten. Bislang wurden die Objekte, die gedruckt werden sollten, immer als Kopie eines Originals erzeugt oder mussten schichtweise erstellt werden. Erst mit dem Aufkommen der Computertechnik entstand die echte Möglichkeit, die im Computer erzeugten, virtuellen 3D-Modelle auch in der Wirklichkeit entstehen zu lassen.

Einen deutlich fortschrittlicheren Ansatz verfolgte der Däne Swainson in den späten 1960er Jahren [201]. Er nutzte wie Munz ebenfalls eine elektromagnetische Strahlungsquelle, um höhere Intensitäten an definierten Raumpunkten zu erzeugen, kann aber dabei auf den Transport des Materials mittels Hebebühne verzichten. Bei Swainson ist nun der gesamte Materialblock, der flüssig, fest oder gasförmig sein kann, die Projektionsfläche wodurch auch ein dreidimensionaler Projektor benötigt wird. Die Grundlegende Idee ist die Kreuzung von zwei Strahlen in einem bestimmten Punkt des Bildes, wodurch am Kreuzungspunkt eine höhere Energie vorliegt und die beabsichtigte, für Auge sichtbare¹³² oder materialverändernde Wirkung eintritt. Die Eleganz der Lösung liegt in der Bildquelle. Swainson schlägt als Bildgeber Hologramme vor, die mit der entsprechenden Wellenlänge¹³³ rekonstruiert werden und so reelle Intensitäten in den Materialblock eintragen¹³⁴. Swainson kombiniert zu diesem frühen Zeitpunkt seine Kenntnis der Hologramme mit dem Wissen über Möglichkeit der Erzeugung computergenerierter Programme und der Strahlung des Lasers.

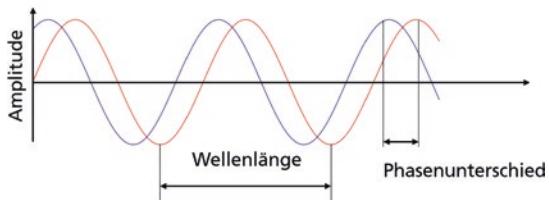
¹³¹Aus griech. stereo=örperlich+lithos=Stein+graphein=Schreiben, im Englischen auch stereolithography apparatus (SLA), photo-solidification, resin printing oder einfach optical fabrication.

¹³²Swainson denkt hier schon an das dreidimensionale Fernsehen.

¹³³Sichtbares Licht, aber auch Infrarot, Ultraviolett, Mikrowellen, Ultraschall und sogar Röntgenstrahlen (was ein wenig gegen den Einsatz als Fernsehgerät spricht).

¹³⁴Der Vollständigkeit halber sei hier noch auf die Möglichkeit der direkten Kreuzung zweier Strahlen zur Energiepunkerzeugung hingewiesen, die sich ebenfalls in Swainsons Patent wiederfindet.

Abb. 5.20 Wasserwelle mit Wellenform, Grasnick (2019), Foto von Gerd Altmann (Pixabay)



Hologramme

Als Swainson 1967 sein Patent anmeldete, waren Hologramme noch etwas sehr Neues. Der Nobelpreis für die Entdeckung der Holografie noch nicht vergeben, der Laser war noch „a solution seeking a problem“¹³⁵

Gabor, der erst 1971 den Nobelpreis bekommen sollte, machte seine Entdeckung 1947 bei dem Versuch der Verbesserung der Optik des Elektronenmikroskop, dessen bis dahin bestmögliche Objektiv er mit der Abbildungsqualität eines Regentropfens verglich [202]. Seine grundlegende Idee war, das Bild eben mit der Qualität aufzunehmen, die praktisch erreichbar war, aber dafür mit „allen“ Informationen, die erfassbar waren. Damit war für den Elektronenoptiker Gabor unmittelbar klar, dass neben der Intensität des Bildes, auch dessen Phase miterfasst werden musste. Dazu muss zunächst das Licht als Welle betrachtet werden, was seit Huygens ein bekanntes Modell ist. Das Licht breite sich also wie eine Wasserwelle in allen Richtungen gleichmäßig aus und nimmt dabei die bekannte Form an (s. Abb. 5.20 oben)

Unter dem Bild ist die Wellenform der Welle in einem Querschnitt illustriert (durch den roten Pfeil im Wellenfoto angedeutet). Die rote Welle hat eine bestimmte Wellenlänge¹³⁶ und Amplitude¹³⁷. Die Phase einer Welle beschreibt deren Position zu einem bestimmten Zeitpunkt im Vergleich zu einer Referenz. Wenn die rote Welle die Referenz ist, ist die blaue Welle zu der roten Welle um einen bestimmten Phasenunterschied verschoben. Die beiden Wellen überlagern sich auf bestimmte Weise, wie Young schon 1802 erkannte: „Wenn zwei Wellenformen von verschiedenen Ursprüngen entweder perfekt oder nahezu in der Richtung zusammenfallen, ist ihr gemeinsamer Effekt eine Kombination der Bewegungen, die zu jeder [Welle] gehören.“¹³⁸ Diese

¹³⁵ „eine Lösung, die ein Problem sucht“; eine häufig zitierte Feststellung des Laser-Erfinders Maian.

¹³⁶Der Abstand zwischen zwei Wellenbergen – oder tälern.

¹³⁷Nicht die Intensität, aber quadratisch proportional dazu, sodass sich eines aus dem anderen herleiten lässt.

¹³⁸Im Original: „When two Undulations, from different Origins, coincide either perfectly or very nearly in Direction, their joint effect is a Combination of the Motions belonging to each.“ (aus [203], S. 34).

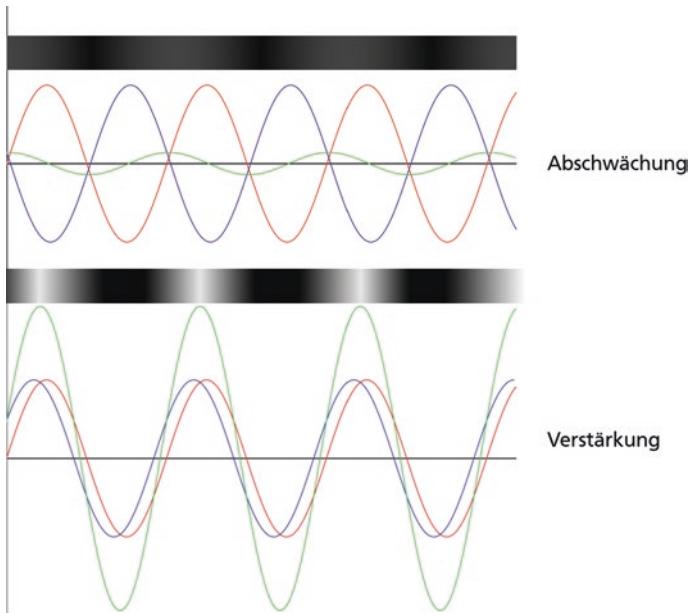


Abb. 5.21 Interferenz zur Verstärkung und Abschwächung, Grasnick (2019)

Überlagerung ist das Wesen der Interferenz¹³⁹. In einer erläuternden Skizze sind die Effekte illustriert (Abb. 5.21). Im oberen Diagramm ist die blaue Welle gegenüber der roten um ca. eine halbe Wellenlänge versetzt. In der Addition der Werte fällt die resultierende Amplitude (grün) fast auf Null. Das Resultat wäre eine Abschwächung der Intensität¹⁴⁰ im Bild (dargestellt als schwacher Grau-Schwarz-Wechsel über dem Diagramm). Im unteren Diagramm liegen die beiden Wellenzüge (rot, blau) fast übereinander und erzeugen so in der Addition eine höhere Amplitude¹⁴¹ (grün).

Diese Interferenzmuster hatte Fresnel bereits 1815 beobachtet und beschrieben [204].

In Kenntnis der Forschung seiner Vorgänger war Gabor sich bewusst, dass er zur Ermittlung der Phase eine Referenzwelle benötigt, um dadurch die Phasenverschiebung zu ermitteln. Damit das gelingt, muss das Wellenfeld die Eigenschaft der Kohärenz¹⁴² aufweisen, womit gemeint ist, dass das Licht in einer bestimmten Wellenlänge (monochromatisch) ausgestrahlt wird und eine feste Phasenverschiebung vorliegen muss. Dieses kohärente Referenzlicht interferiert nun auf dem Aufnahmefilm mit dem vom Objekt veränderten Licht. Die Referenz- und Objektstrahl auf dem Film erzeugen Interferenzmuster ergeben das Hologramm. Gabor bildete mit seiner Technik zuallererst eine winzige Platte mit weniger als 1,5 mm Durchmesser ab, auf der die Namen Huygens, Young

¹³⁹Von lat. inter = zwischen + ferire = schlagen treffen.

¹⁴⁰Destruktive Interferenz.

¹⁴¹Konstruktive Interferenz.

¹⁴²Lat.: cohaerere = zusammenhängen.

und Fresnel standen. Im Hologramm verschwanden die Buchstaben und wurden durch das typische Interferenzmuster ersetzt. Beleuchtete man die Platte aber wieder mit dem Referenzstrahl, so wurden die Namen wieder (einigermaßen) lesbar [205].

Gabor selbst hatte zuerst allerdings wenig Freude an seiner Entdeckung, da die Qualität der Abbildung recht gering war. Ursächlich dafür war die geringe Qualität (in Bezug auf Kohärenz) seiner Lichtquelle, einer einfachen Quecksilberdampflampe. Es vergingen noch einige Jahre, bis Maiman 1960 einen funktionstüchtigen Laser für das sichtbare Licht entwickelte [206]. Der Laser war von Anfang an in der Lage, kohärentes Licht in hoher Intensität auszusenden¹⁴³. Auch hier war die Technik früher als die Anwendung und der Laser war keineswegs ein Kassenschlager.

Eine wirklich brauchbare Anwendung für den Laser stellten Leith und Upatnieks 1964 vor [208]. Mittels Gabors Holografie hatten sie die dreidimensionale Fotografie eines realen Objektes¹⁴⁴ erzeugt, die zudem eine Bewegungsparallaxe erlaubte und Möglichkeit der Fokussierung auf unterschiedlich weit entfernte Objekte im Bild unterstützte. Seit Anfang der 1960er Jahre hatten sich die beiden Physiker mit Gabors Holografie beschäftigt (s. [209]) und dazu zwei wichtige Verbesserungen eingeführt. Gabor hatte das aufzunehmende Objekt direkt in den Referenzstrahl gehalten und so ein Hologramm erzeugt, das als In-Line-Hologramm bekannt ist. Bei der Betrachtung wird durch den Referenzstrahl ein reelles und ein virtuelles Bild gleichzeitig erzeugt, was natürlich störend wirkt. Leith und Upatnieks trennte den Strahl in einen Beleuchtungsstrahl und einen Referenzstrahl auf. Damit verschwand das Doppelbild und das Hologramm wirkte noch überzeugender. Dazu hatten sie eine starke kohärente Lichtquelle zur Verfügung, den Laser [210].

Die Holografie wurde in den 1970er Jahren recht populär und viele Forscher beteiligten sich an der Erfindung¹⁴⁵. Es schien eine Zeitlang, als könnten mit der Holografie alle Probleme der 3D-Darstellung gelöst werden. Wie bei jedem Hype, stellte sich auch in diesem Fall heraus, dass die technische Realisierung nicht mit der Erwartungshaltung Schritt halten konnte. Ein holografisches Fernsehen ist nach wie vor Illusion. Es würde den Rahmen dieses Buches sprengen, hier noch eine komplette Geschichte der Holografie einzufügen oder jede einzelne Entwicklung zu besprechen. Wer daran ein ehrliches Interesse hat, dem sei Johnstons Buch „Hographic Visions: a History of New Science“ [215] wärmstens empfohlen.

Klar ist, dass für eine Umsetzung des latenten (flüchtigen) Raumbildes auch ein Material existieren muss, dass mit dem mit der Strahlung des Hologramms reagieren kann. Bei der Beleuchtung mit Licht können das fotoempfindliche Materialien sein, die durch Wärme fixiert werden. So ist kann ein Strahl die Lichtstrahlung führen und ein zweiter den Wärmestrahl. Im Kreuzungspunkt treffen Wärme und Licht zusammen und der Punkt

¹⁴³S. z. B. Maimans Patent von 1961 [207], Maiman verwendet Goulds Bezeichnung Laser „light amplification by stimulated emission of radiation“, aber auch „optical maser“.

¹⁴⁴Das Objekt selbst war wenig spektakulär: eine Spielzeugeisenbahn und ein Spielzeugvogel („train and bird“).

¹⁴⁵Ohne Wertung oder Bevorzugung seien hier zumindest einige Persönlichkeiten genannt: zwei maßgebliche Forscher (Yuri Denisyuk [211] und Steve Benton [212]) und zwei bekannte Holografie-Künstler (Lloyd Cross [213] und Fred Unterseher [214], mit der gemeinsamen Firma „Multiplex“ Hersteller von Multiplex-Hologrammen wie „The Kiss“ oder „The Brain of Alice Cooper“ für Salvador Dali).

ist fixiert. Swainson skizziert zudem noch einige mögliche Materialien¹⁴⁶, mit dem sich die gewünschte Figur erzeugen lässt. Der interessanteste Teil ist vielleicht der, in dem auf die Verwendung von Kunststoffen und deren Übergang vom löslichen in den unlöslichen Zustand eingegangen wird, z. B. durch Polymerisation oder Schmelzen. Erfolgreiche Versuche wurden mit Polyesterharz und Ultraviolettbeleuchtung gemacht, was eine „voll aus-polymerisierte und steife Figur ergab“ (aus [201], S. 31). Eine Phosphor-Flüssigkeit¹⁴⁷ ergab unter ultraviolettem Licht einen grünlichen Punkt, der durch Umrühren verschwand, verschieden andere Flüssigkeiten erzeugten bei unterschiedlicher Strahlung Lichteffekte oder feste Figuren. Ganz allgemein hatte Swainson in seinem Patent schon vieles beschrieben, was in späteren Jahren im Bereich 3D-Druck umgesetzt werden sollte. Ein wichtiger Punkt ist hier zu notieren: Swainson unterscheidet nicht in haltbare und flüchtige Objekte, so wie heute in 3D-Druck und 3D-Display unterschieden wird. In jedem Fall ist es die Herstellung eines dreidimensionalen Objektes; eben entweder real oder virtuell.

Swainson steuerte noch weitere Entwicklungen bei¹⁴⁸, war aber seiner Zeit womöglich ein wenig voraus und mit seinem Unternehmen Formigraphic nicht sonderlich erfolgreich. Generell war er aber einer der ersten, der Computer zur Erstellung von 3D-Objekten einsetzte.

Auch der amerikanische Ingenieur DiMatteo hatte mittels eines Computers aus einzelnen Platten ein 3D-Objekt erzeugt, was aber wiederum die Verklebung der einzelnen Platten zu einem Gesamtobjekt bedingte [218]. Der Prozess unterscheidet sich prinzipiell wenig von den schon beschriebenen Prozessen Blanthers oder HeliSys.

Ebenso wie der Däne Swainson beschrieb auch der Japaner Kodama einen Fertigungsprozess auf Basis von härzbaren Polymeren [219]. Kodamas Verdienst ist die Entwicklung eines durchaus praktikablen Gerätes. Aus seiner Beschreibung geht hervor, das Kodama eine kostengünstige Umsetzung eines dreidimensionalen Modells aus dem Computer in die Realität beabsichtigte. Er benutzte dafür ein marktverfügbares lichthärtendes Polymer¹⁴⁹. Über einen Lichtleiter wurde eine Ultra-Violett-Lampe auf einen handelsüblichen xy-Plotter geführt, der über dem flüssigen Polymer befestigt war. Über einen Shutter konnte die Einkopplung des UV-Lichtes in den Lichtleiter durch

¹⁴⁶Eigentlich mehr deren Eigenschaften: fotoempfindlich, fluoreszierend, phosphoreszierend, fotochrom oder thermochrom, sodass die Vorrichtung nicht nur ein Drucker, sondern auch ein Volumendisplay ist.

¹⁴⁷Eine ungesunde Mischung aus Samarium, Cer und Strontiumsulfid-Phosphorpulver (s. hierzu z. B. die Kapitel Fluoreszenz und Phosphoreszenz in „Die Lehre von der strahlenden Energie“ [216]).

¹⁴⁸Von denen hier nur die Schrift „Verfahren zur Erzeugung von Änderungen der Eigenschaften eines Speichermediums in drei Dimensionen“ genannt werden soll [217], worin -kurz gesagt- ein 3D-Volumenspeicher auf Basis von Multiphotonenabsorption sowie eine veränderliche Linse per 3D-Veränderung der Brechzahl beschrieben wird- faszinierend!

¹⁴⁹„Tevista“ von Teijin (einem japanischem Chemieunternehmen).

den Computer gesteuert werden, sodass das Polymer punktuell gehärtet wurde. Wie ins Munz's Apparat, wird auch bei Kodama die Hebebühne um die Schichtdicke abgesenkt, neues Polymer aufgetragen und die nächste Schicht belichtet. Dieser 3D-Drucker war bereits fein und schnell genug¹⁵⁰, um kleinere Modelle zu drucken. Der japanische Physiker druckte also einige Modelle und präsentierte diese seine Idee auf Konferenzen, bei Maschinenherstellern und in Fachzeitschriften. Nachdem er keinerlei Interesse für seine Idee gefunden und überdies die Frist für den Prüfungsantrag seines Patentes versäumt hatte, beendete Kodama sein Karriere als Forscher und wurde – Patentanwalt (aus einem Interview mit Kodama [220]).

Der amerikanische Physiker Hull, der um die gleiche Zeit am gleichen Thema arbeitete war da schon erfolgreicher. Er hatte monatelang in seinem Labor an seiner Idee experimentiert, um aus Photopolymer und UV-Licht Objekte zu erstellen. Die Begeisterung hielt sich auch hier zunächst in Grenzen. Hull selbst erzählte in einem Interview, dass seine Frau, als er sie zu nachtschlafender Zeit in sein Labor holte, um ihr sein erstes Ergebnis zu zeigen ausrief: „Wehe, es ist nicht wichtig!“ [221].

Hull meldete 1984 ein Patent an, das dem Entwurf von Kodama überaus ähnlich ist [222]. Dieses Patent enthält bereits die Bezeichnung „Stereolithografie“, für die Hull somit als Urheber gelten darf. Hull vereinte die Technologie zur Herstellung einer dreidimensionalen Kopie mit den zu seiner Zeit bereits bekannten Verfahren zur Erzeugung der 3D-Dateien im „Computer Aided Design¹⁵¹“ (CAD) und „Computer Aided Manufacturing¹⁵²“ (CAM) zur Stereolithographie. Die von Hulls Firma 3D-Systems entwickelte 3D-Körperbeschreibung der Druckdateien „STL“ war als Abkürzung für „Stereolithographie“ zunächst die Dateinamenserweiterung (*.stl, s. z. B. [225], S. 31), aber auch von Beginn an die Beschreibung der Körperoberfläche durch einzelne Dreiecke¹⁵³.

¹⁵⁰Bei einer Punktgröße von $0,1 \times 2$ mm und einer Schichtdicke von 2 mm benötigte der Drucker eine Druckzeit von 4,5 h für ein Objekt von $70 \times 50 \times 54$ mm.

¹⁵¹Computerunterstütztes Konstruieren, spätestens bekannt seit Entwicklung der Programmiersprache APT (Automatically Programmed Tool), ab 1956 – am Massachusetts Institute of Technology (s. [223], S. 35), als „Erfinder“ der Bezeichnung „computer-aided design“ (und „-manufacturing“) gilt Douglas Ross [224].

¹⁵²Computerunterstützte Fertigung, auch hierfür wird Douglas Ross genannt, der tatsächlich 1959 computergestützt (per APT) einen Aschenbecher aus Aluminium fräste [224].

¹⁵³Die sogenannte „Parkettierung“ oder „Kachelung“ von Flächen durch kleinere geometrische Figuren (engl. „Tessellation“) ist grundsätzlich seit Platons Beschreibung der „platonischen“ Körper bekannt, Platons Oktaeder besteht aus 8 Dreiecken, Hull kann mit seinem Druckapparat SLA-1 allerdings bis zu 14.000 Dreiecke verarbeiten (s. [226], S. 50).

Auch wenn Hull mit seinem 3D-Drucker vielleicht nicht der einzige Erfinder war¹⁵⁴, so hat er doch mit der Kommerzialisierung der dreidimensionalen Drucktechnik einen neuen Markt etabliert. Natürlich wurde auch mit anderen Materialien exprimiert. Die Einführung des selektiven Lasersinterns (SLS¹⁵⁵) durch den Amerikaner Deckard ab 1986 [230] ermöglichte die Fertigung funktionaler Bauteile aus dem Pulver verschiedener Metalle und Kunststoffe. Die fertigen Objekte können aufgrund der Materialien sehr hart sein. Damit sind sie sofort einsetzbar und können ohne Stützstrukturen auch mit Hinterschneidungen¹⁵⁶ gefertigt werden. Die Objekte müssen dabei nicht zwingend aus den gängigen Materialien Kunststoff oder Metall beschrieben. Swainson hatte schon Ende der 1960er Jahre darauf hingewiesen, dass es letztlich nur zwei Dinge braucht: Gerichtete Energiestrahlung und ein Medium, in dem eine physikalische Änderung hervorgerufen wird (in [201] ab S. 37). Befindet sich bei Swainson das Aggregat noch zwischen zwei gekreuzten Energiestrahlen, in deren Kreuzungspunkt die physikalische Wirkung eintritt, so genügt Hull ein einzelner Strahl¹⁵⁷. Hulls „Solidifikation“ (hier der Übergang vom flüssigen zum festen Aggregatzustand) wird bei Deckard durch ein Erhitzen des Pulvers und eine dadurch verursachte Verbindung der Partikel ersetzt. Dadurch sind die nutzbaren Materialien vielfältiger und erweitern sich von den Kunststoffen und Polymeren auch auf Metall, Keramikwerkstoffe oder auch Komposite, d. h. Verbundwerkstoffe aus mehreren Materialien (in [230], Summary). Der Prozess des Lasersinterns unterscheidet sich vom Laserschmelzen dadurch, dass beim Sintern das Pulver definitionsgemäß nur oberflächlich aufschmilzt, wodurch sich die einzelnen Körner beim Erstarren fest miteinander verbinden. Beim Schmelzen dagegen geht das Material tatsächlich in die flüssige Schmelze über. Ob das Material nun geschmolzen ist oder nicht (und ob demzufolge lasergesintert oder -geschmolzen wird), lässt sich bei Metallen ganz einfach durch das Überschreiten des Schmelzpunktes bestimmen, bei Glas oder Thermoplasten gilt hier die „Glasübergangstemperatur“, bei der diese Materialien vom festen in einen zähflüssigen Zustand übergehen.

¹⁵⁴Neben all den bereits genannten werden die Franzosen André, de Witte und Le Méhauté als besonders unglücklich beschrieben, da diese kurz vor Hull einen 3D-Drucker entwickelt hatten [227], die Entwicklung durch den damaligen Anmelder (CILAS ALCATEL) jedoch nicht weiter verfolgt wurde [228].

¹⁵⁵Wobei der Name „Selective Laser Sintering“ erst in einer späteren Anmeldung (1989) von Beaman und Deckard auftaucht [229].

¹⁵⁶Wenn z. B. eine Kugel nicht nur als Halbkugel (Relief), sondern als volle Kugel gedruckt werden soll, dann müsste die hintere Form (die der Betrachter nicht sieht) ab dem Äquator nach hinten immer kleiner werden (also quasi eingeschnitten sein).

¹⁵⁷Aber auch hier nicht auf das Licht des Lasers begrenzt, sondern allgemein als Strahl beschrieben (z. B. Elektronenstrahl, Strahl energiereicher Teilchen, Röntgen- oder UV-Strahl und sogar einen Materiestrahl aus reaktionsfähigen Chemikalien) s. z. B. in [231] Ansprüche 8–14.

Das Laserschmelzen wurde maßgeblich vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) in Aachen entwickelt¹⁵⁸, um bei der industriellen Prototypenherstellung nicht nur die äußere Form realisieren zu können, sondern darüber hinaus auch die Materialeigenschaften, was eine direkte Erprobung der „gedruckten“ Prototypen ermöglicht [232]. Der Prozess wurde durch das Lübecker Unternehmen SLM Solutions Group unter dem Namen „Selective Laser Melting¹⁵⁹“ optimiert und bekanntgemacht. Um noch höhere Energien in das Pulver einzutragen und so auch Materialien mit hohem Schmelzpunkt zu drucken (z. B. Implantate aus Titan) werden auch Elektronenstrahlen zum Schmelzen eingesetzt¹⁶⁰. Eine Elektronenstrahlkanone baut auf dem Prinzip der Braunschen Röhre auf, ist aber auf hohe Leistungen optimiert.

All die genannten Verfahren sind doch einigermaßen aufwändig und eher für den professionellen Anwender, als für den interessierten Enthusiasten geeignet und eher Fertigungsmaschinen, als 3D-Drucker. Das was heute allgemein als 3D-Drucker gilt, beherbergt eine deutlich schlichtere Technik. Der amerikanische Ingenieur Crum suchte Ende der 1980er Jahre eine einfache, preiswerte und schnelle Möglichkeit, Prototypen herzustellen. Sein Ausgangspunkt war ähnlich wie bei Kodama die Beobachtung eines 2D-Plots. Auf einem Plotter fährt der Stift über die Zeichenfläche und hinterlässt eine Tintenspur auf dem Papier. Was wäre, so dachte sich Crump, wenn nun anstelle der Tinte geschmolzenes Plastik aus dem Stift käme? Die Umsetzung war recht einfach. In den 80ern waren Heißklebepistolen bereits recht verbreitet (in den USA vermutlich vorzugsweise 3Ms „Polygun“) und so experimentierte auch Crump mit einem solchen Gerät [235]. Sein Patent von 1989 zielt auf ein Gerät ab, das an einen Bürocomputer angeschlossen werden kann und in einer vernünftigen Zeit ein 3D-Objekt erzeugen kann. Dabei fährt der Druckkopf über eine Fläche und druckt dabei das verflüssigte Druckmaterial in definierter Menge auf die Fläche. Die entscheidende Innovation Crumps, ist nicht die Verschiebung des Druckkopfs oder die Verflüssigung des Materials. Es ist die Art des Materials und dessen Zuführung zur Düse. Die Drucksubstanz besteht aus schmelzbarem Material, das in einem flexiblen Strang auf einer Spule aufgerollt ist. Crumps Unternehmen StrataSys nannte das Verfahren „Fused Deposition Modeling“ (Schmelzsicht-Modellierung). Da die zugehörige Abkürzung „FDM“ eine von StrataSys eingetragene Marke ist, hat sich für den gleichen Prozess in der Open-Source-Community die Abkürzung FFF etabliert. Dies steht für „Fused Filament Fabrication¹⁶¹“.

¹⁵⁸Dafür gab es dann 2011 den Innovationspreis des Landes NRW.

¹⁵⁹Selektives Laserschmelzen, SLM ist auch eine eingetragene Marke der SLM Solutions Group.

¹⁶⁰Z. B. von der schwedischen Firma Arcam, deren Gründer Larson 1993 ein Patent anmeldete, bei dem die Energie noch in Form von unspezifischen „Energiewellen“ ins Material eingetragen wurde [233], später war es dann die „Elektronenkanone“ [234], Arcam hält auch die Marke EBM (für „Electron Beam Melting“=Elektronenstrahlschmelzen).

¹⁶¹Schmelz-Filament-Fertigung, mit Filament (Faser) aus lat. filamentum = Fadenwerk.

Diese Bezeichnung wurde von den Mitgliedern des RepRap¹⁶²-Projektes vorgeschlagen, um eventuellen rechtlichen Problemen mit StrataSys vorzubeugen. Tatsächlich beabsichtigte der Initiator Bowyer die Neumansche-Selbstreplikation zum Wohle der Gesellschaft im Sinne der Demokratisierung der Produktionsmittel zu nutzen. Bowyer schreibt selbst (aus [238]): „Somit wird die replizierende Rapid-Prototyping-Maschine den revolutionären Besitz der Produktionsmittel durch das Proletariat ermöglichen. Aber dies wird ohne all diesen schmutzigen und gefährlichen Revolutionskram geschehen, und sogar ohne all den schmutzigen und gefährlichen industriellen Kram. Daher habe ich entschieden, diesen Prozess Darwin'schen Marxismus zu nennen...“

Einen anderen Weg gingen die Forscher vom „Three Dimensional Printing Laboratory“ des Massachusetts Institute of Technology. Das ist nicht nur technisch, sondern insbesondere auch kommerziell gemeint, denn das MIT entwickelte das Verfahren nicht nur, sondern lizenzierte es später an die 3D-Printindustrie. In dem schon 1989 am MIT entwickelten Prozess wird das Pulver mit einem Bindemittel verklebt, dass von einem Druckkopf auf aufgetragen wird [239]. Bis auf die Pulverbühne ist der Prozess dem des normalen Druckens am ähnlichsten. Wenn von 3D-Druck¹⁶³ gesprochen wird, ist in aller Regel dieses Verfahren gemeint.

Die grundlegenden Verfahren für alle Technologien wurden in den 1980er Jahren patentiert. Mittlerweile sind diese Schutzrechte ausgelaufen, wodurch sich die heutige Vielzahl der Marktteilnehmer erklärt.

Lichtpunkte im Raum

Der 3D-Druck und alle anderen Verfahren der additiven oder generativen Fertigung erlauben die Realisierung der Virtualität in einem begrenzten Raum. Additiv ist es immer dann, wenn dem Bauteil während der Fertigung etwas hinzugefügt wird, von generativer Fertigung spricht man, wenn das Bauteil aus dem Medium gewissermaßen „erzeugt“ wird. Der schon mehrfach gebraucht Begriff der Solidifikation beschreibt das, was dabei passiert. Aus einem undefinierten Substrat, einem Pulver oder einer Flüssigkeit entstehen Objekte im Raum. Wenn man sich diesen Raum in ein dreidimensionales Raumgitter eingeteilt vorstellen würde, könnte jeder einzelne Raumpunkt über seine x-y-z-Koordinate angesprochen werden. Als digitales Bild betrachtet, wären diese Raumpunkte dann keine Pixel mehr, sondern Voxel, also „Volumen Pixel“.

Von Anfang an war die Idee des 3D-Prototyping nicht von der 3D-Darstellung zu trennen. Swainson hatte mit seinem Verfahren auch dreidimensionale, sich bewegende Abbildungen im Volumen verbunden und so die Basis für ein dreidimensionales Farbfernsehsystem entworfen.

Die Idee wurde zwar von Swainson noch nicht umgesetzt, später jedoch in einigen volumetrischen Displays angewendet. Die grundsätzliche Idee dahinter ist die definierte Ansteuerung einzelner Voxel in einem Raum, die dann von allen Seiten an einer bestimmten Position gesehen werden können. Dabei entsteht ein neues Problem; man benötigt irgendeine Substanz in dem

¹⁶²RepRap ist die Abkürzung für „replicating“ und „rapid prototyping“, eine Machine, die ihre Teile selbst drucken kann und von jedermann nachgebaut werden kann. Das Open-Source-Projekt [236] wurde 2004 vom britischen Ingenieur und Mathematiker Bowyer entwickelt [237].

¹⁶³Verwendet werden natürlich auch die englischen Bezeichnungen 3D print, binder jetting oder inkjet 3D print.

Volumen, an der man Lichtpunkte aktivieren kann. Das können Gase, Flüssigkeiten oder Festkörper sein, die sich irgendwie durch Energiestrahlung anregen lassen¹⁶⁴. Ein einfacherer Weg ist die Projektion auf mehrere Ebenen. Dazu können einfachste Flüssigkristalldisplays verwendet werden, die keine Polfilter aufgeklebt haben und von transparent auf streuend schalten können. Das amerikanische Unternehmen Lightspace¹⁶⁵ hatte mehrere solcher Panels hintereinander angeordnet und so ein Schichtbild mit mehreren Ebenen erzeugt [242]. Dieses statische Volumendisplay benötigt bei feiner Raumstaffelung auch immer mehr Projektionsebenen. Die Erhöhung der Anzahl der Ebenen kann aber nicht unbegrenzt erfolgen, da die LC-Schichten nicht vollständig transparent werden können, sondern immer ein wenig streuen.

Man benötigt also eine möglichst geringe Anzahl von Ebenen bei gleichzeitig großem Volumen und geringem Ebenenabstand. Dazu hatten einige junge Leute vom Stader VFN¹⁶⁶ eine spannende Idee. Sie deformierten eine Projektionswand zu einer Helix und projizierten während der Umdrehung darauf mit einem Laser räumliche Figuren [243]. Ein ganz ähnliche Projektionsform wählte das amerikanische Unternehmen Actuality Systems, die mit ihrem System „Perspecta“ die Projektion in einem kleinen Dome (ca. 30 cm im Durchmesser) darboten [244]. Trotzdem das Perspecta-System -zumindest eine Zeitlang- eine gewisse Resonanz erfuhr, sind solche Systeme noch unausgereift. Die Projektionsfläche ist in der Regel klein, die Darstellung der Grafiken eher einfach und das System zudem teuer.

Allerdings haben solche Systeme einen entscheidenden Vorteil. Man braucht die 3D-Datei nicht auszudrucken und kann sie dennoch wie in der Realität von allen Seiten betrachten.

Literatur

1. The Palace Museum. Zhang Zeduan: life along the Bian River at the Pure Brightness Festival, Painting. The Palace Museum – Collections. 2019. <https://en.dpm.org.cn/collections/collections/2009-10-19/990.html>. Zugegriffen: 17. Aug. 2019.
2. Barker R. Specification of the Patent granted to Mr. Robert Barker, of the City of Edinburgh, Portrait Painter; for his Invention of an entire new Contrivance or Apparatus, called by him La Nature a Coup d’Œil. Repertory of Arts and Manufactures. London: Wilkie and Robinson; 1796. S. 165–7.
3. University of Cambridge. A panoramic view | A damned serious business. Panorama, Leicester Square. <https://exhibitions.lib.cam.ac.uk/waterloo/artifacts/pam-6-81-231-folding-plate-opposite-title-page/>. Zugegriffen: 17. Aug. 2019.
4. Daguerre LJM. Das Daguerreotyp und das Diorama. Stuttgart: J. B. Metzlersche Buchhandlung; 1839.
5. le Gall G. Die Welt von Paris aus betrachtet. In: Wedekind G, Haug S, Herausgeber. Die Stadt und ihre Bildmedien. Paderborn: Wilhelm Fink; 2018.

¹⁶⁴Dazu gab es einige Erfindungen, die aber allesamt nicht über Prototypenstadium hinausgekommen sind; eine umfangreiche Zusammenstellung findet sich in [240].

¹⁶⁵Heute in Lettland ansässig [241].

¹⁶⁶Verein zur Förderung naturwissenschaftlichen Nachwuchses, der sich seit den 1990er Jahren mit der Entwicklung von volumetrischen Displays beschäftigt.

6. Wood RD. The diorama in great Britain in the 1820s. *Hist Photogr.* 1993;17:284–95.
7. von Zedlitz L, Herausgeber. Neustes Conversations-Handbuch für Berlin und Potsdam zum täglichen Gebrauch der Einheimischen und Fremden aller Stände. Berlin: Eifersdorff; 1834.
8. Bertuch FJ. Porte-Feuille – Bertuch's Bilderbuch. Weimar: Verlag des Gr. H. S. priv. Landes-Industrie-Comptoir; 1830.
9. Milano A. Wunderbare Lichteffekte mit Papier- Tag- und Nachtbilder in den Guckkästen gezaubert. In: Brückner W, Vanja K, Lorenz D, Nagy S, Herausgeber. Arbeitskreis Bild Druck Papier Tagungsband Modena 2010 Il Gruppo di Studio Bild Druck Papier (Immagine Stampa Carta) a Modena. Münster: Waxmann; 2011.
10. Mannoni L. Le grand art de la lumière et de l'ombre: archéologie du cinéma. Paris: Nathan; 1995.
11. Menier & Cie, Pharmaciens-Droguistes. Maison Centrale de Droguerie, Prix Courant Général. Paris: Plon Frères; 1854.
12. Houdin R. Magie et physique amusante. Paris: Ancienne Maison Michel Lévy Frères; 1877.
13. Evans HR. The old and the new magic. Chicago: Kegan Paul, Trench, Trübner & Co.; 1906.
14. Mannoni L. La lanterne magique du Boulevard du Crime. Henri Robin Fantas Magic. 1895;1994(16):5–26.
15. Brockhaus, Herausgeber. Conversations-Lexicon der neuesten Zeit und Literatur. M bis R. Leipzig: F. A. Brockhaus; 1833.
16. Langhans CF, Kopisch A. Pleorama, erfunden und aufgestellt von C. F. Langhans. Erläuterungen der in dem Pleorama erscheinenden Gegenstände. Breslau: Eduard Philipp; 1831.
17. Waller F, Walker R. Motion picture theater. Patent, US 163,712. 1937.
18. von Hueck A. Von den Gränzen des Sehvermögens. Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin. 1840
19. Seldes G, Garrison R. Your world of tommorow. Rogers-Kellogg-Stillson; 1939.
20. Martin RG. Mr. Cinerama. *TRUE the Man's Magazine.* 1953;
21. Panorama on a Giant Screen. *Popular Mechanics Magazine.* 1949;110–1.
22. Boyle JW. And Now... CINERAMA. *American Cinematographer.* 1952;480–1, 498–500.
23. Waller F, Huntington NY, Dresser WR. Method and apparatus for projecting motion pictures. Patent, US 2,392,440.
24. Rolfe JM, Staples KJ. Flight simulation. Repr. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.
25. Hawker TM. Hawker VC: RFC ace: the life of Major Lanoe Hawker VC DSO 1890–1916. 2013 edition. Barnsley, South Yorkshire: Pen & Sword Aviation; 2013.
26. Broelmann J. Lehrschaukel zur Fliegekunst – Der Flugsimulator Franz Drexlers. *Kultur & Technik.* 1995;19:24–25.
27. Biermann K, Cielewicz E. Flugplatz Döberitz: Geburtsort der militärischen Luftfahrt in Deutschland. 1. Aufl. Berlin: Links; 2005.
28. Lender M, Heidelberg P. Appareil pour l'apprentissage sans danger de la conduite des avions. Patent, FR 503648A.
29. La Section de Cinématographie Technique de la Direction des Inventions. Le Pilote. Frankreich: Direction des Inventions, des études et des expériences techniques. 1919. http://www.cnc-aff.fr/internet_cnc/Internet/ARemplir/parcours/EFG1914/pages_DE/4161.html.
30. Crossman EC. „Dry Shooting“ for Airplane Gunners. *Pop Sci Mon.* 1919;94:13–4.
31. Heilig ML. EL Cine del Futuro: the cinema of the future. *Presence Teleoper Virtual Environ.* 1992;1:279–94.
32. Heilig ML. The cinema of the future. (1955). In: Packer R, Jordan K, Herausgeber. Multi-media: from Wagner to virtual reality. Expanded ed. New York: Norton; 2002. S. 239–51.
33. Jütte R. Geschichte der Sinne: von der Antike bis zum Cyberspace. München: Beck; 2000.

34. Aristoteles. Aristoteles über die Seele. Aus dem Griechischen übersetzt und mit Anmerkungen begleitet. Frankfurt: Johann Herrl; 1794.
35. Kant I. Träume eines Geistersehers, erläutert durch Träume der Metaphysik. Königsberg: Johann Jacob Kanter; 1766.
36. Becker-Carus C, Wendt M. Wahrnehmung. Allgemeine Psychologie. Berlin: Springer; 2017. S. 73–156.
37. Schopenhauer A. Die Welt als Wille und Vorstellung. Bernel L, Herausgeber. München: Georg Müller; 1912.
38. Schopenhauer A. Die Welt als Wille und Vorstellung. Bernel L, Herausgeber. München: Georg Müller; 1913.
39. Heilig M. Sensorama simulator. Patent, US 3,050,870. 1961.
40. Borgwald C. Abtauchen in die fünfte Dimension. OSTSEE-ZEITUNG. Rostock; 13. November 2011.
41. Heilig ML. Experience theather. Patent, US 3,469,837. 1966.
42. Heilig ML. Beginnings: Sensorama and the Telesphere Mask. In: Dodsworth C, Herausgeber. Digital illusion: entertaining the future with high technology. New York : ACM Press, Addison-Wesley; 1998. S. 343–51.
43. Heilig ML. Stereoscopic-television apparatus for individual use. Patent, US 2,955,156. 1957.
44. Montgomery C. Recalling Columbia's startling trip to the rose bowl. The New York Times. New York; 27. Dezember 1981;2.
45. Robertson P. The guiness book of film: fact & feats. London: Guinness Superlatives Limited; 1980.
46. Huxley A. Schöne neue Welt: ein Roman der Zukunft. 68. Aufl. Frankfurt a. M.: Fischer; 2012.
47. [S.N.]. Duftender Film. Zürcher Illustrierte. 1940;16.
48. R. S. Camera Eye: Reporter-At-Large. Business Screen Magazine. 1940;3:4.
49. Burnstock T. Scent of Mystery (1960). Scented storytelling. <https://scentedstorytelling.com/2017/02/25/scent-of-mystery-1960/>. Zugegriffen: 25. Aug. 2019.
50. Hoffman FW, Bailey WG. Arts and entertainment fads. New York: The Hawort Press; 1990.
51. Weinbaum SG. Pygmalions spectacles. Wonder Stories. 1935;7:28–39.
52. Lem S. Summa technologiae. 7. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp; 2016.
53. Sutherland IE. The ultimate display. Proceedings of the Congress of the Internation Federation of Information Processing (IFIP). 1965. S. 506–8.
54. StarTrek.com Staff. Meet The Man Behind The Holodeck, Part 1. STAR TREK. 2014. <https://intl.startrek.com/article/meet-the-man-behind-the-holodeck-part-1>. Zugegriffen: 1. Sept. 2019.
55. Pike OJ, Mackenroth F, Hill EG, Rose SJ. A photon–photon collider in a vacuum hohlraum. Nat Photonics. 2014;8:434.
56. Breit G, Wheeler JA. Collision of two light quanta. Phys Rev. 1934;46:1087–91.
57. Wallach H, O'connell DN. The kinetic depth effect. J Exp Psychol. 1953;45(4):205–17.
58. Green JBF. Figure coherence in the kinetic depth effect. J Exp Psychol. 1961;62:272–82.
59. Sutherland IE. A head-mounted three dimensional display. Proceedings of the December 9–11, 1968, fall joint computer conference, part I on – AFIPS '68 (Fall, part I). San Francisco: ACM Press; 1968. S. 757.
60. Delaney B, Furness TA. Sex drugs and tesselation: the truth about virtual reality as revealed in the pages of CyberEdge Journal. Oakland: CyberEdge Information Service; 2014.
61. Cicero MT. Tuscanische Unterredungen. Stuttgart: J. B. Metzlersche Buchhandlung; 1827.
62. Broderick D. The Judas Mandala. New York: Pocket Books; 1982.
63. Artaud A. The theater and its double. New York: Grove Press; 1958.

64. Lanier J. Virtually there. *Sci Am.* 2001;284:66–75.
65. Langer SK. Feeling and form. New York: Charkles Scribner's Sons; 1953.
66. Evenden I. The history of virtual reality. Virtual reality – the complete guide. Bristol: Immediate Media Co; 2016.
67. Sutherland IE. Sketch pad a man-machine graphical communication system. Proceedings of the SHARE design automation workshop on – DAC '64. Not Known: ACM Press; 1964. S. 6.329–6.346.
68. Davis MR, Ellis TO. The RAND tablet: a man-machine graphical communication device. Proceedings of the October 27–29, 1964, fall joint computer conference, part I on XX – AFIPS '64 (Fall, part I). San Francisco, California: ACM Press; 1964. S. 325.
69. Atkinson P. A bitter pill to swallow: the rise and fall of the tablet computer. *Des Issues.* 2008;24:3–25.
70. Roberts LG. The Lincoln WAND. Proceedings of the November 7–10, 1966, fall joint computer conference on XX – AFIPS '66 (Fall). San Francisco, California: ACM Press; 1966. S. 223. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1464291.1464317>. Zugegriffen: 9. Sept. 2019.
71. Gallé K. Erziehungsalarm: Weckruf für Eltern und Bildungsverantwortliche. 1. Aufl. Wien: Braumüller Verlag; 2015.
72. Goldstein GD, Neumann AJ, Herausgeber. TRANSAC models – PHILCO. *Digit Comp NewsL.* 1957;9:7–8.
73. Comeau CP, Bryan JS. Headsight television system provides remote surveillance. *Electronics.* 1961;34:86–90.
74. Minsky M. Telepresence. *OMNI.* 1980.
75. Fisher SS. Viewpoint dependent imaging: an interactive stereoscopic display. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts; 1981 Okt.
76. Clarke AC. The second century of the telephone. The view from Serendip. New York: Random House; 1977.
77. Heinlein RA. Waldo. Die Zeit der Hexenmeister (Waldo & Magic Inc). 4. Aufl. München: Heyne; 1980.
78. Fisher SS, McGreevy M, Humphries J, Robinett W. Virtual environment display system. Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics – SI3D '86. Chapel Hill, North Carolina, United States: ACM Press; 1987. S. 77–87.
79. Krueger MW. Responsive environments. Proceedings of the June 13–16, 1977, national computer conference on – AFIPS '77. Dallas: ACM Press; 1977.
80. University of Minnesota PowerWall Team. University of Minnesota PowerWall. SC94 Press Release. 1994. <https://www.lcse.umn.edu/research/powerwall/powerwall.html>. Zugegriffen: 6. Sept. 2019.
81. Czernuszenko M, Pape D, Sandin D, DeFanti T, Dawe GL, Brown MD. The immersa-desk and infinity wall projection-based virtual reality displays. *SIGGRAPH Comput Graph.* 1997;31:46–9.
82. Sandstrom TA, Henze C, Levit C. The hyperwall. Proceedings International Conference on Coordinated and Multiple Views in Exploratory Visualization – CMV 2003. London: IEEE; 2003. S. 124–33.
83. Miller GA. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychol Rev.* 1956;63:81–97.
84. Cruz-Neira C, Sandin DJ, DeFanti TA, Kenyon RV, Hart JC. The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Commun ACM.* 1992;35:64–72.
85. DeFanti TA, Sandin DJ. Final Report to the National Endowment of the Arts. 1977. Report No.: US NEA R60-34-163.

86. evl staff. Sayre Glove (first wired data glove). evl/electronic visualization laboratory. 1977. <https://www.evl.uic.edu/entry.php?id=2162>. Zugegriffen: 6. Sept. 2019.
87. Grimes GJ. Digital data entry glove interface device. Patent, US4,414,537. 1981.
88. Schmitt OH. A thermionic trigger. *J Sci Instrum.* 1938;15:24–6.
89. Bonet JP. Reducción de las letras y arte para enseñar a hablar los mudos. Madrid: Francisco Abarca de Angulo; 1620.
90. Haggerty JJ. Spinoff 1990. Washington: NASA; 1990. Report No.: NASA-NP-138, NAS 1.83:138.
91. Zimmermann TG. Optical flex sensor. Patent, US 4,542,291. 1982.
92. Zimmerman TG, Lanier J, Blanchard C, Bryson S, Harvill Y. A hand gesture interface device. Proceedings of the SIGCHI/GI conference on human factors in computing systems and graphics interface – CHI '87. Toronto: ACM Press; 1987. S. 189–92.
93. Harvill YL, Zimmerman TG, Grimeaud J-J. Motion sensor which produces an asymmetrical signal in response to symmetrical movement. Patent, US 5,097,252. 1989.
94. Gentile CT, Wallace M, Avalon TD, Goodman S, Hall T. Angular displacement sensors. Patent, US 5,086,785. 1989.
95. Saggio G, Riillo F, Sbernini L, Quitadamo LR. Resistive flex sensors: a survey. *Smart Mater Struct.* 2016;25:013001.
96. Ditlea S. Grand Illusion coming soon, to your home... *New York Mag.* 1990;23:27–34.
97. Kuipers J. Tracking and determining orientation of object using coordinate transformation means, system and process. Patent, US3,983,474. 1975.
98. Hamilton WR. Lectures on quaternions: containing a systematic statement of a new mathematical method. Dublin: Hodges and Smith; 1853.
99. Kuijpers JB. Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality. Princeton: Princeton University Press; 2002.
100. Bolt RA. “Put-that-there”: voice and gesture at the graphics interface. *SIGGRAPH Comput Graph.* 1980;14:262–70.
101. Sturman DJ, Zeltzer D. A survey of glove-based input. *IEEE Comput Grap Appl.* 1994;14:30–9.
102. Anderson B. Case study: a look at video animation. *Broadcast Eng.* 1979;21:86–8.
103. Ginsberg CM. Human body motion as input to an animated graphical display. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts; 1983.
104. Maxwell DR. Graphical marionette: a modern-day Pinocchio. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts; 1983.
105. Woltring HJ. New possibilities for human motion studies by real-time light spot position measurement. *Biotelemetry.* 1974;1:132–46.
106. Woltring HJ. Calibration and measurement in 3-dimensional monitoring of human motion by optoelectronic means. I. preliminaries and theoretical aspects. *Biotelemetry.* 1975;2:169–96.
107. Burton RP, Sutherland IE. Twinkle box: a three-dimensional computer input device. Proceedings of the May 6–10, 1974, national computer conference and exposition on – AFIPS '74. Chicago: ACM Press; 1974. S. 513.
108. Labs Yost. Yost Labs 3-Space sensor product family. Ohio: Yost Labs Inc; 2017.
109. Mann S. Steve Mann my augmediated life – IEEE spectrum. IEEE spectrum: technology, engineering, and science news. 2013. <https://spectrum.ieee.org/geek-life/profiles/steve-mann-my-augmediated-life>. Zugegriffen: 13. Sept. 2019.
110. Maffiuletti NA, Minetto MA, Farina D, Bottinelli R. Electrical stimulation for neuromuscular testing and training: state-of-the art and unresolved issues. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111:2391–7.

111. Purchese R. Happy go luckey: meet the 20-year-old creator of Oculus Rift. Eurogamer.net. 2013. <https://www.eurogamer.net/articles/2013-07-11-happy-go-luckey-meet-the-20-year-old-creator-of-oculus-rift>. Zugegriffen: 13. Sept. 2019.
112. The Guardian Staff. Facebook closes its \$2bn Oculus Rift acquisition. What next?/technology/The Guardian. 2014. <https://www.theguardian.com/technology/2014/jul/22/facebook-oculus-rift-acquisition-virtual-reality>. Zugegriffen: 13. Sept. 2019.
113. Stynes T, Walker J. Stryker to acquire mako surgical for about \$1.65 Billion. Wall Street Journal. 25. September 2013. <https://www.wsj.com/articles/stryker-to-acquire-mako-surgical-for-about-165-billion-1380114400>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.
114. Quaid AE, Abovitz RA. Guidance system and method for surgical procedures with improved feedback. Patent, EP 1 680 007 B1. 2004.
115. Quaid A, Kang H, Moses D, Ferre M, Hajaj B, Roche M, et. al. Haptic guidance system and method. 2008.
116. D'Onfro J. GOOGLE'S \$500 MILLION MAN: Meet the „Weird“ guy trying to invent a new computing platform. Business Insider Deutschland. <https://www.businessinsider.de/rony-abovitz-magic-leap-2014-12>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.
117. Webber M. In place of a new TED Talk from Magic Leap, we bring you ... [Internet]. TED Blog. 2015. <https://blog.ted.com/a-mysterious-message-in-a-tedx-talk/>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.
118. Rittenhouse D. An Optical Problem, proposed by Mr. Hopkinson, and solved by Mr. Rittenhouse. Transactions of the American Philosophical Society. Philadelphia: Robert Aitken; 1786. S. 201–6.
119. Fraunhofer J. Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre. Ann Phys. 1817;56:264–313.
120. Fraunhofer J. Neue Modifikation des Lichtes durch gegenseitige Einwirkung und Beugung der Strahlen, und Gesetze derselben. München: Lentner; 1820.
121. Haüy R-J. Essai d'une Théorie sur la Structure des Crystaux. Paris: Gogué & Née de La Rochelle; 1784.
122. Bravais A. Abhandlung über die Systeme von regelmässige auf einer Ebene im Raum vertheilten Punkten. Leipzig: Wilhelm Engelmann; 1897.
123. Bragg WH, Bragg WL. The reflection of X-rays by crystals. Proc Roy Soc Math Phy Eng Sci. 1913;88:428–38.
124. Levola T. Diffractive optics for virtual reality displays. J Soc Inf Disp. 2006;14:467.
125. Levola T, Saariko P. Device for expanding an exit pupil in two dimensions. Patent, US 8,160,411. 2006.
126. Bradski GR, Miller SA, Abovitz RA. Methods and systems for creating virtual and augmented reality. Patent, US 2016/0026253 Juni 13, 2015.
127. Watts M. Semiconductor engineering – molecular imprints becomes a virtual reality company. Semiconductor Engineering. 2015. <https://semiengineering.com/molecular-imprints-becomes-a-virtual-reality-company/>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.
128. Macnamara JG. Three dimensional virtual and augmented reality display system. Patent, US 8,950,867 Nov 23, 2012.
129. Kolbow-Lehradt B. Microsoft HoloLens angetestet: Ich sehe was, was du nicht siehst – Netzpiloten.de. Netzpiloten Magazin. 2016. <https://www.netzpiloten.de/microsoft-hololens-angetestet-augmented-reality-brille/>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.
130. Janssen J-K, Czerulla HA. Microsoft HoloLens im Test: Tolle Software, schwaches Display. <https://www.heise.de/ct/artikel/Microsoft-HoloLens-im-Test-Tolle-Software-schwaches-Display-3248670.html>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.

131. Sauter M. Magic Leap One ausprobiert: Für 2 Milliarden US-Dollar hätten wir mehr erwartet – Golem.de. golem.de IT-News für Profis. 2018. <https://www.golem.de/news/magic-leap-one-ausprobiert-fuer-2-milliarden-us-dollar-haetten-wir-mehr-erwartet-1812-137902.html>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.
132. Bikoulis A. Magic Leap One im Hands-On-Test: Ist Augmented Reality bereit für die Wirklichkeit? PC Games Hardware. 2018. <https://www.pcgameshardware.de/Virtual-Reality-Hardware-258542/Specials/magic-leap-im-test-augmented-reality-1269329/>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019
133. Spinger C. Magic Leap One im Test: Die derzeit beste Mixed-Reality-Brille [Internet]. VR-Nerds. 2018. <https://www.vrnerds.de/magic-leap-one-im-test-die-derzeit-best-mixed-reality-brille/>. Zugegriffen: 15. Sept. 2019.
134. Fröhlich B, Plate J. The cubic mouse: a new device for three-dimensional input. Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems – CHI '00. The Hague, The Netherlands: ACM Press; 2000. S. 526–31.
135. Mosher RS. Handyman to Hardiman. 1967. <https://www.sae.org/content/670088/>. Zugegriffen: 21. Sept. 2019.
136. Fick BR, Makinson JB. Final Report on Hardiman I Prototype for Machine Augmentation of Human Strength and Endurance. Washington und Fort Belvoir: Engineering Psychology Programs Office of Naval Research, Naval Air Systems Command and Army Mobility Equipment Research and Development Center; Report No.: N00014-66-C0051.
137. Fukuda H, Morishita T, Ogata T, Saita K, Hyakutake K, Watanabe J, et. al. Tailor-made rehabilitation approach using multiple types of hybrid assistive limb robots for acute stroke patients: a pilot study. Assistive Technol. 2016;28:53–6.
138. Sankai Y. HAL: Hybrid assistive limb based on cybernics. In: Kaneko M, Nakamura Y, Herausgeber. Robotics research. Berlin: Springer; 2010. S. 25–34.
139. Cyberdyne Inc. CYBERDYNE. <http://www.cyberdyne.jp/>. Zugegriffen: 21. Sept. 2019.
140. Iida F, Anastasiades B, Gunura K. Wearable posture assisting device. Patent, EP 2 842 527.
141. Noonee. noonee. Chairless chair. 2019. <https://www.noonee.com/>. Zugegriffen: 21. Sept. 2019.
142. Meech KJ, Weryk R, Micheli M, Kleyna JT, Hainaut OR, Jedicke R, et. al. A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid. Nature. 2017;552:378–81.
143. Mahr K. Der Kampf um die Pyramiden. München: Moewig; 1965.
144. Francis HG. Stützpunkt Donnergott. München: Moewig; 1974.
145. Naish J. Why scientists say this object could be an alien spaceship. 2017. <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5173329/Why-scientists-say-object-alien-spaceship.html>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
146. Parsons J. Oumuamua might not be an alien spacecraft after all. Mirror. 2017. <http://www.mirror.co.uk/science/oumuamua-might-not-alien-spacecraft-11699149>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
147. Sample I. Is Oumuamua an alien spacecraft? Initial scans show no signs of technology. The Guardian. 15. Dezember 2017. <http://www.theguardian.com/science/2017/dec/14/is-oumuamua-an-alien-spacecraft-first-scans-show-no-signs-of-technology>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
148. Online F. Stephen Hawking ist alarmiert: Liefert Oumuamua Beweis für außerirdisches Leben? – Video. FOCUS. <https://www.focus.de/wissen/weltraum/>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
149. Fuge L. How to recognise an alien spaceship. Cosmos Magazine. 2017. <https://cosmosmagazine.com/space/how-to-recognise-an-alien-spaceship>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
150. von Neumann J. Theory of self-reproducing automata. Burks AW, Herausgeber. Urbana, USA: University of Illinois Press; 1967.

151. Williams GV. MPEC 2017-V17 : New designation scheme For interstellar objects. Minor planet center, Smithsonian Astrophysical Observatory. 2017. <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K17/K17V17.html>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
152. Breakthrough Initiatives. Breakthrough listen to observe interstellar object ‘Oumuamua. 2017. <https://breakthroughinitiatives.org/news/14>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
153. Breakthrough Initiatives. Breakthrough listen releases initial results and data from observations of Oumuamua. 2017. <https://breakthroughinitiatives.org/news/15>. Zugegriffen: 29. Dez. 2017.
154. Pauls E. Zauberwesen und Hexenwahn am Niederhein. Beiträge zur Geschichte des Niederrheins. Düsseldorf: Ed. Lintz; 1898. S. 134.
155. Bouginé CJ. Handbuch der allgemeinen Litterargeschichte. Zürich: Orelí, Geßner, Fülli und Comp.; 1789.
156. de Caus S. Von Gewaltsamen bewegungen: Beschreibung etlicher, so wol nützlichen alß lustigen Machiner beneben Unterschiedlichen abriessen etlicher Höllen od. Grotten und lust Brunne. Frankfurt: Abraham Pacquart; 1615.
157. Hänggi CE. Automatenkunst im 18. Jahrhundert. Kunst+Architektur in der Schweiz. 2012;63:4–9.
158. Descartes R, v. Kirchmann JH. René Descartes’ philosophische Werke. Erste Abtheilung. Lebensbeschreibung. Abhandlung über die Methode. Berlin: L. Heimann; 1870.
159. Vaucanson J. Le Mécanisme du fluteur automate présenté à messieurs de l’Académie royale des sciences. Paris: Jacques Guerin; 1738.
160. de Vaucanson J. Beschreibung eines mechanischen Kunst-Stucks und Automatischen Flöten-Spielers so denen Herren von der Königlichen Academie der Wissenschaften zu Paris durch den Herrn Vaucanson Erfinder dieser Maschine überreicht worden, samt Einer Description sowohl einer künstlich-gemachten Ente, die von sich selbst das Essen und Trincken hinein schluckt ... Augsburg: Johann Andreas Erdmann Maschenbaur; 1748.
161. von Helmholtz H. Ueber die Wechselwirkung der Naturkräfte und die darauf bezüglichen neuesten Ermittlungen der Physik. Königsberg: Gräfe & Unzer; 1854.
162. Schneider B. Blumenweberei für Esel: Musterwebstühle und Androiden im 18. Jahrhundert. Kultur Technik. 2007;31:26–9.
163. Babbage C. Passages from the life of a Philosopher. London: Longman, Roberts & Green; 1864.
164. Babbage C. On the application of machinery to the computation of astronomical and mathematical tables. London: Richard Taylor; 1824.
165. Alex J. Zur Entstehung des Computers: von Alfred Tarski zu Konrad Zuse: zum Einfluss elementarer Sätze der mathematischen Logik bei Alfred Tarski auf die Entstehung der drei Computerkonzepte des Konrad Zuse. Düsseldorf: VDI; 2007.
166. Gautier T. Le Club Des Hachichins. Revue des Deux Mondes (1829–1971). 1846;13:520–535.
167. Moreau J-J. Du hachisch et de l’aliénation mentale: études psychologiques. Paris: S.E.M.P; 1845.
168. Gautier T. Photosculpture – Extrait du Moniteur universel. Paris: Paul Dupont; 1864.
169. Scheiner C. Pantographice, seu Ars delineandi res quaslibet per parallelogrammum lineare seu cavum, mechanicum, mobile. Rom: Ludouici Grignani; 1631.
170. Willème F. Photo-Sculpture. Patent, US 43,822. 1864.
171. Gautier T, Alisch J, Roes M. Avatar. 1. Aufl. Berlin: Matthes & Seitz; 2011.
172. Stolze F. Photosculptur. In: Eder JM, Herausgeber. Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik. Halle a. S.: Wilhelm Knapp; 1893. S. 494–8.

173. o. V. Selkes Photoskulptur. Neuhaus R, Juhl E, Herausgeber. Photograph Rundsch. 1899;13:364.
174. Pötschke H. Verfahren, Gegenstände mit Hilfe der Photographie plastisch abzubilden. 1891.
175. Selke W. Photosculpture apparatus. Patent, US 675,417. 1898.
176. o. V. Über Selkes Photoskulptur. Neuhaus R, Juhl E, Herausgeber. Photograph Rundsch. 1900;14:59.
177. Dcopysystems. Big Alice – Welcome to the wonderful world of Alice. 2019. <https://3dcopy-systems.com/big-alice/>. Zugegriffen: 27. Sept. 2019.
178. Blanther JE. Manufacture of contour relief maps. Patent, US 473,901. 1890.
179. Mueller B, Kochan D. Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. Comput Ind. 1999;39:47–53.
180. Feygin M, Hsieh B. Laminated Object Manufacturing (LOM): a simpler process. Solid free-form fabrication – conference. Austin, Texas; 1991. S. 123–30.
181. Siemens Healthineers MedMuseum. Die Geschichte der Computertomographie bei Siemens Healthineers. Erlangen: Siemens Healthcare; 2018.
182. Cormack AM. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. J Appl Phys. 1963;34:2722–7.
183. Cormack AM. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. II. J Appl Phys. 1964;35:2908–13.
184. Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Descrip Syst BJR. 1973;46:1016–22.
185. Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. Leipzig: B. G. Teubner; 1917. S. 262–77.
186. Baese C. Photographisches Verfahren zur Herstellung plastisch richtiger Bildwerke. Photographische Rundschau und Photographisches Centralblatt. 1904;18. Jahrgang:127–9.
187. Baese C. Photoskulptur. Photograph Korrespond. 1904;41:391–389.
188. Kernreuter O, Räth K. Die Reliefphotographien. Photograph Korrespond. 1899. S. 134–41.
189. Allgeyer J. Handbuch über das Lichtdruck-Verfahren. Leipzig: Karl Scholtze; 1881.
190. Namias R. Ueber eine neue Eigenschaft der Bichromatgelatine. Jahrb Photograph Reproduktionstechnik Jahr. 1909;1909(23):89–92.
191. Baese C. Photographic Process for the Reproduction of Plastic Objects. Patent, US 774,549. May 17, 1904.
192. Pötschke H, Laric O. Bust of Johann Wolfgang von Goethe (Photosculpture)/Three D Scans. Three D Scans. <http://threescans.com/albertina/poetschke/>. Zugegriffen: 1. Okt. 2019.
193. Berger K, Ruhl K, Schroeder Y, Bruemmer C, Scholz A, Magnor M. Markerless motion capture using multiple color-depth sensors. Vision. 2011;Modeling:8 pages.
194. Nitzan D, Brain AE, Duda RO. The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis. Proc IEEE. 1977;65:206–20.
195. Leica Geosystems. Leica ScanStation P50 – Technische Daten. Leica Geosystems AG; 2017.
196. Morioka I. Process for manufacturing a relief by the aid of photography. Patent, US 2,015,457. Feb 20, 1933.
197. Przybilla H-J. Streifenprojektion – Grundlagen, Systeme und Anwendungen. Schriftenreihe des DVW, Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagemen. Augsburg: Wißner; 2007. S. 111–22.
198. Monteath FH. Photomechanical process for producing bas-reliefs. Patent, US 1,516,199. Sep 23, 1922.
199. Munz OJ. Photo-Glyph recording. Patent, US 2,775,758. Mai 25, 1951.
200. Munz OJ. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Photoreliefs. Patent, DE 1 148 859. Nov 16, 1956.

201. Swainson WK. Verfahren und Material zur Herstellung einer dreidimensionalen Figuren. Patent, DE 1 797 599. 1967.
202. Gabor D. Nobel Lecture – Holography [Internet]. Stockholm. 1971. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1971/gabor/lecture/>. Zugegriffen: 3. Okt. 2019.
203. Young. II. The Bakerian Lecture. On the theory of light and colours. Phil Trans R Soc Lon. 1802;92:12–48.
204. Fresnel A. Premier mémoire sur la diffraction de la lumière. In: de Senarmon H, Verdet E, Fresnel L, Herausgeber. Œuvres complètes d'Augustin Fresnel (1866–1870). Paris: Imprimerie Impériale; 1815.
205. Gabor D. A new microscopic principle. Nature. 1948;161:777–8.
206. Maiman TH. Stimulated optical radiation in ruby. Nature. 1960;187:493–4.
207. Maiman TH. Ruby laser systems. Patent, US 3,353,115.
208. Leith EN, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects. J Opt Soc Am. 1964;54:1295.
209. Leith EN, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory. J Opt Soc Am. 1962;52:1123.
210. Leith EN, Upatnieks J. Photography by laser. Sci Am. 1965;212:24–35.
211. Denisyuk YuN. My way in holography. Leonardo. 1992;25:425.
212. Benton SA, Bove VM. Holographic imaging. Hoboken: Wiley-Interscience; 2008.
213. Cross LG, Cross C. HoloStories: reminiscences and a prognostication on holography. Leonardo. 1992;25:421.
214. Unterseher F, Hansen J, Schlesinger B. Handbuch der Holographie: Wie mache ich Hologramme selber? München: Popa; 1991.
215. Johnston SF. Holographic visions: a history of new science. Oxford: Oxford University Press; 2006.
216. Chwolson OD. Die Lehre von der strahlenden Energie. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn; 1922.
217. Swainson WK. Verfahren zur Erzeugung von Änderungen der Eigenschaften eines Speichermediums in drei Dimensionen. Patent, DE 26 33 036. Juli 22, 1976.
218. DiMatteo PL. Method of generating and constructing three-dimensional bodies. Patent, US 3,632,923. Okt 21, 1974.
219. Kodama H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. Rev Sci Instrum. 1981;52:1770–3.
220. Tsuji A. 3D Printing and Nagoya University [Internet]. Meida Watch. 2019. <http://www.meidaiwatch.itech.provost.nagoya-u.ac.jp/en/2019/06/3d.html>. Zugegriffen: 2. Okt. 2019.
221. Ponsford M, Glass N. „The night I invented 3D printing“ [Internet]. CNN Business. 2014. <https://www.cnn.com/2014/02/13/tech/innovation/the-night-i-invented-3d-printing-chuck-hall/index.html>. Zugegriffen: 2. Okt. 2019.
222. Hull CW. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patent, US 4,575,330. 1984.
223. Ward JE. Automatic Programming of Numerically Controlled Machine Tools. Cambridge: Electronic Systems Laboratory, Massachusetts Institute of Technology; 1960. Report No.: 6873-FR-3.
224. Ross DT. Origins of the APT language for automatically programmed tools. SIGPLAN Not. 1978;13:61–99.
225. Hull CW, Lewis CW. Stereolithographic supports. 1988.
226. Hull CW. Stereolithographic supports. 1989.
227. André J-C, Le Mehauté A, De Witte O. Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle. Juli 16, 1984.

228. Mendoza HR. Alain Le Méhauté, The man who submitted patent for SLA 3D printing before Chuck Hull. 3DPrint.com/the voice of 3D printing/additive manufacturing. 2015. <https://3dprint.com/65466/reflections-alain-le-mehaute/>. Zugegriffen: 10. Okt. 2019.
229. Beaman JJ, Deckard CR. Selective laser sintering with assisted powder handling. Sep 5, 1989.
230. Deckard CR. Method and apparatus for producing parts by selective sintering. Okt 17, 1986.
231. Hull CW. Stereolithographische Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Gegenständen. Aug 8, 1984.
232. Meiners W, Wissenbach K, Gasser A. Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers, Patent, DE 196 49 865. Dez 2, 1996.
233. Larson R. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung dreidimensionaler Körper. Mai 12, 1993.
234. Andersson L-E, Larsson M. Device and arrangement for producing a three-dimensional object. Apr 27, 2000.
235. Mantey D. A Man & His Glue Gun. manufacturing.net. 2012. <https://www.manufacturing.net/blog/2012/06/man-his-glue-gun>. Zugegriffen: 11. Okt. 2019.
236. Bowyer A, RepRap Community. Welcome to RepRap.org. RepRap. 2004. <https://reprap.org/wiki/RepRap>. Zugegriffen: 11. Okt. 2019.
237. Bowyer A. 3D Printing and humanity's first imperfect replicator. 3D printing and additive manufacturing. 2014;1:4–5.
238. Bowyer A. Reichtum ohne Geld – Der Hintergrund zum Bath Replicating Rapid Prototyper Projekt. RepRap. 2004. https://reprap.org/wiki/Wealth_Without_Money/de. Zugegriffen: 15. Jan. 1999.
239. Sachs EM, Haggerty JS, Cima MJ, Williams PA. Three-dimensional printing techniques. September, 1989.
240. Blundell B, Schwarz AJ. Volumetric three-dimensional display systems. New York: Wiley; 2000.
241. LightSpace Technologies. Gen3 Volumetric 3D image front view and surface displays – www.lightspace3d.com. <https://www.lightspace3d.com/index.php/Products/gen3-volumetric-3d-image-displays/>. Zugegriffen: 11. Okt. 2019.
242. Sullivan A. A solid-state multi-planar volumetric display. SID Symp Digest of Technical Papers. 2003;34:1531.
243. Bahr D, Langhans K, Bezevcny D, Homann D, Vogt C. FELIX: a volumetric 3D imaging technique. In: Proc. SPIE 3101 Refregier P, Ahlers R-J, Herausgeber. 1997. S. 202–10.
244. Favolora GE, Napoli J, Hall DM, Dorval RK, Giovinco M, Richmond MJ, et al. 100-million-voxel volumetric display. In: Proc. SPIE 4712 Hopper DG, Herausgeber. 2002. S. 300–12.



Schlussbetrachtung

6

Die „wirkliche“ virtuelle Realität

Zusammenfassung

Der Computerpionier Sutherland hatte vor mehr als 50 Jahren die Vision einer virtuellen Welt, die er als das „ultimative Display“ bezeichnete. Am Ende unserer Reise durch die Zeiten und die virtuelle Realität sollen die Dinge noch einmal geordnet werden. Zum Schluss noch ein Blick auf das, was heute möglich ist und ein Ausblick auf das, was vielleicht einmal sein wird.

Nach den vielfältigen Beschreibungen der Eigenarten virtueller Realität soll zum Schluss noch einmal der Versuch gemacht werden, ein wünschenswertes, oder gar das „ultimative“ VR-Display zu beschreiben. Hier kann aber nun, in Kenntnis der tatsächlichen Möglichkeiten, auf das abgestellt werden, was in absehbarer Zeit machbar wäre.

Deshalb ignorieren wir zunächst Dolgofts Idee von der faktischen Materialisierung der Hologramme und Sutherlands Traum von der computergesteuerten Kontrolle der Materie. Und da wir schon einmal bei Sutherland sind: Vielleicht ist unser ultimatives Display ja gar kein Display, sondern eine Brille?

Aber der Reihe nach. Unsere Reise startete mit dem Besuch von Platons Höhle und deutete die Diskrepanz zwischen Realität und Wahrnehmung an. Das was wir wahrnehmen, muss nicht zwangsläufig das sein, was der Wirklichkeit entspricht. Es ist nur das, was uns durch geschickte Präsentation vorgegaukelt wird, welches wir, in Ermangelung besseren Wissens, für echt halten. Die Lichtzeichnungen mit der Camera obscura ermöglichen die Abbildung der äußeren Welt auch demjenigen, der zur Malerei gänzlich ungeeignet ist. Will man die flüchtigen Bilder manifestieren, so hilft die Kenntnis der Perspektive, eine realistische Kopie zu erstellen. Auch hier kann durch technische Mittel wie der Fotografie auch dem Unbegabten eine Meisterleistung gelingen. Das Werk muss nicht von Hand vervielfältigt werden, sondern kann mit den Nachfolgern

der Laterna magica auf eine flache Wand geworfen werden, wobei die flache Wand auch gern selbst der Bildschirm sein darf.

Will man die Verfahren und Apparaturen zur Erzeugung einer künstlichen Realität ordnen, so ist man schnell versucht, eine Klassifizierung zu erstellen. Unabhängig von dem tieferen Sinn eines solchen Vorhabens, können sich schon daraus neuerliche Probleme ergeben, wie der argentinische Schriftsteller Borges in seinem Essay „El idioma analítico de John Wilkins¹“ illustriert. Er lässt den Sinologen Franz Kuhn aus der chinesischen Enzyklopädie „Himmlischer Wareschatz wohltätiger Erkenntnisse“ die Einteilung der Tiere zitieren (aus [4], S. 15–16):

„a) dem Kaiser gehörige, b) einbalsamierte, c) gezähmte, d) Milchschweine, e) Sirenen, f) Fabeltiere, g) streunende Hunde, h) in diese Einteilung aufgenommene, i) die sich wie toll gebärden, j) unzählbare, k) mit feinstem Kamelhaarpinsel gezeichnete, l) und so weiter, m) die den Wasserkrug zerbrochen haben, n) die von weitem wie Fliegen aussehen“

In dieser Beschreibung der Mängel von Wilkins Sprache manifestieren sich Borges Zweifel an der Möglichkeit einer allgemeingültigen Klassifikation, die nicht willkürlich ist. Borges, einer der Väter des „Magischen Realismus“², vermischt in seiner Analyse geschickt das Reale mit dem Fiktiven und präsentiert wirkliche Personen mit fingierten Zitaten aus erfundenen Büchern. Hier begegnet uns wieder die literarische Kunst als virtuelle Realität, was nicht verwunderlich sein darf, da nach Langer die Kunst ja zwangsläufig virtuelle Realitäten erschaffen muss.

Borges Kunst erfährt einen Widerhall in der Realität, als der französische Philosoph Foucault sich seinerseits an eine „Ordnung der Dinge“ macht [5]. Foucault erwähnt im Vorwort seines Buches, von dem Vergnügen, aber auch dem Unbehagen, das ihn bei der Lektüre von Borges Text, beschlich. Die wirre und absurde Unordnung in dessen Kategorien lässt unwillkürlich Schmunzeln, nährt aber auch die Sorge, dass sich die Dinge nur schwerlich ordnen lassen. Die Ordnung der Dinge muss aber doch irgendwie anhand von Segmenten, Variationen, Ähnlichkeiten oder Unterschieden definiert werden können (aus [5], S. 22):

„Die Ordnung ist zugleich das, was sich in den Dingen als ihr inneres Gesetz, als ihr geheimes Netz ausgibt, ..., was nur durch den Raster eines Blicks, einer Aufmerksamkeit, einer Sprache existiert.“

In unserem Fall wäre ein weites Feld zu sortieren. Es gibt zahlreiche Vorschläge, die verschiedenen antiken Philosophien, Stile der Malerei, Verfahren zur dreidimensionalen

¹ „The Analytical Language of John Wilkins“ (in [1]), „Die analytische Sprache von John Wilkins“ (in [2]) ist vor allem eine Kritik Sprache Wilkins, der im 17. Jahrhundert versuchte, alle Dinge des Universums in nur 40 Kategorien zu unterteilen [3].

² Einer künstlerischen Strömung des frühen 20. Jahrhunderts in Malerei und Literatur, bei der die Grenzen zwischen Realität und Fantasie verschwinden.

Abbildung oder generative Technologien zu klassifizieren. Man kann auch hier nach unsinnigen Kategorien ordnen³ oder nur grob einteilen. Wie in der Vorrede zu diesem Buch gesagt wurde (und hoffentlich auch deutlich wurde) ging es mir bei den Grundlagen der virtuellen Realität hauptsächlich um Beschreibung der Möglichkeiten der Darstellung, der Erzeugung der virtuellen Realität. Es wurden hier nun einige Verfahren und Geräte beschrieben, die mitunter recht speziell sind. Eigentlich genügt aber eine Unterscheidung in diejenigen Verfahren, die ein echtes Raumbild erzeugen und solche, die nur eine Illusion des Raumes vermitteln. Diese einfache Unterscheidung genügt, um die Verfahren einzuteilen. Wie haben auf der einen Seite die echten Raumbilder, die eben aus wirklichen Punkten im Raum zusammengesetzt sind. Da dies nicht nur feste Materialien, sondern natürlich auch Lichtpunkte sein können, fallen darunter alle figürlichen Darstellungen, volumetrische Projektionen und schließlich die Holografie. Unter der Prämissen dieses Buches ist das die **reale Virtualität**. Dafür belassen wir für die illusionserzeugenden Verfahren, die kein echtes Raumbild liefern (also alle monoskopischen, stereoskopischen und autostereoskopischen Technologien) die Bezeichnung **fiktive Virtualität**⁴. Das ist schon eine handhabbare Unterscheidung, verlangt aber nach dem Oberbegriff **Virtualität**, die man als die Darstellung des virtuellen Raumes der virtuellen Realität verstehen könnte.

► **Virtualität** Bei der räumlichen Darstellung der virtuellen Realität (**Virtualität**) unterscheidet man in **reale Virtualität**, bei der wirkliche (reale) Objekte tatsächlich im Raum erzeugt werden und in **fiktive Virtualität**, bei der virtuelle (fiktive) Objekte scheinbar im Raum erzeugt werden.

Für das ultimative Display wird auf jeden Fall ein Bildschirm benutzt, der räumliche Bilder darstellen kann.

Alle Verfahren der fiktiven Realität benutzen irgendeine Form von Bildschirm, auf dem gleichzeitig verschiedene Perspektiven dargestellt werden. Vor dem Bildschirm ist in der Regel eine Art von 3D-Optik angebracht, die aus den vermischten Perspektiven wieder die korrekten Perspektiven für das jeweilige Auge extrahiert. Bei einem 3D-Bildschirm ist die Optik für gewöhnlich ein Linsennraster oder eine Parallaxbarriere. In der Stereoskopie liegt die 3D-Optik als Brille weit vor dem Bildschirm dicht am Auge. Bei einer VR-Brille übernehmen die Okulare die Funktion der 3D-Brille führen so zu der bekannten Bauform. Es ist naheliegend, auf eine Brille zu verzichten und eine große Rotunde mit autostereoskopischen Monitoren auszustatten. Allerdings wissen wir um die Probleme des Betrachtungswinkels und der Auflösungsverringerung. Zudem ergibt sich

³z. B. Erfinder, die der Kaiser geadelt hat (Simon Ritter von Stampfer, Franz Freiherr von Uchatius oder Joseph Ritter von Blanther), oder Mörder, die beachtliche Erfindungen gemacht haben (z. B. Eadweard Muybridge und wieder der Ritter von Blanther).

⁴Um nicht zu sagen „virtuelle Virtualität“.

das Problem, der fiktiven Raumpunkte. Ist der Raum groß genug, können die Punkte weit vor der Wand stehen und ein Fokussieren auf diesen Punkt verlangen. Das führt wieder zu dem bekannten Akkommodations-Konvergenz-Problem. Also doch ein Verfahren der realen Virtualität. Wir füllen also den Raum mit Swainsons reaktiven Lösungen, Hulls Polymer oder Crumps Pulver, begeben uns hinein und beginnen mit starken Energiestrahlen in den Raum hineinzuschießen um die Raumpunkte um uns herum zu erzeugen.

Das scheint ganz offensichtlich auch keine gute Idee zu sein. Damit wenden wir uns reumütig Dolgofts holografischen Projektoren zu und wollen damit beginnen ein Holodeck zu bauen. Leider gibt es derzeit weder holografische Projektoren noch holografische Bildschirme in Filmqualität. Die Holografie verlangt nach einer Auflösung, die nach wie vor bei großen Bildschirmen nur von fotografischem Material erreicht wird. Ein Hologramm ist in der Regel statisch und erfüllt damit nicht die Anforderungen an die virtuelle Realität.

Der beste Kandidat für unser Vorhaben wäre tatsächlich eine moderne Form der Lippmannschen Integralfotografie, die beinahe alle Vorteile von realer und fiktiver Virtualität miteinander vereint. Dazu wäre die Hyperview-Technologie vermutlich recht gut geeignet. Zwar hat man einen solchen Hyperview-Dom noch nie gebaut, aber immerhin wäre dies bei ausreichendem finanziellem Support möglich.

Um nun auch mit dem Raumgeschehen in Kontakt zu treten und Laniers Vision von einer sozialen Interaktion im virtuellen Raum mit Leben zu erfüllen, bräuchte man Kameras, Mikrofone und Sensoren zur Aufzeichnung der eigenen Position und Registrierung der vollführten Handlungen. Also Daten-Handschuhe, Suit und Helm...

Wenn man aber schon Minskys Jacke, Waldos Handschuhe und Sutherlands Hut trägt, warum denn dann nicht auch Pygmalions Brille oder Lems Gegenauge?

Und damit kommen wir zur vorher proklamierten These: Das wirklich ultimative Display ist vielleicht gar kein Display – sondern ein kompletter 3D-Anzug.

Dieser enthielt natürlich eine 3D-Brille, mit der die 3D-Welt betrachtet wird und wodurch man auch auf die Display-Rotunde verzichten könnte. Somit kann die Interaktion in jedem Raum stattfinden und ist eben nicht auf große Installationen, die nur von wenigen geleistet werden können, beschränkt.

Der VR-Teilnehmer muss einen Anzug tragen, der ein haptisches Feedback liefert. So kann der Träger nicht nur Temperatur und Feuchtigkeit spüren⁵, sondern auch einen Gegendruck bei virtuell mechanischen Arbeiten oder im Cyber-Spiel erfahren. Dazu wären an den Gelenken des Anzugs, der Finger etc. Vorrichtungen anzubringen, die vom Computer gesteuert, die Bewegung der Gelenke erschweren oder blockieren. Damit könnte der Spieler, wenn er mit Magnetschuhen am Boden befestigt wäre, sich dann wieder auf einen virtuellen Stuhl setzen und als Reminiszenz zur analogen Vergangenheit ein virtuelles Buch lesen.

⁵Wenn gewünscht wie in Heiligs Sensorama auch Wind und Geruch.

Der virtuelle Raum soll dabei nicht auf den wahren Raum des VR-Freundes begrenzt bleiben. Für einen virtuellen Fahrradausflug oder zu einer gemütlichen Ruderbootstour kann man Apparate und Tretmühlen nutzen, in der sich diese Bewegung vollführen lassen. Eine Autofahrt oder ein Flug lassen sich mit dem entsprechenden Simulator bewerkstelligen. Schwieriger wird es, wenn ein Wanderer oder Läufer sich ganz zwanglos in einer virtuellen Welt bewegen soll. Aber selbst hierfür gibt es bereits Möglichkeiten wie den „Cyberwalk“ vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik⁶. Kippt man das ganze Laufband, so könnte man damit sogar Bergwanderungen simulieren.

Damit man sich in der virtuellen Welt auch sehen lassen kann, müsste der Anzug auch einigermaßen schick sein. Aber halt, muss er das wirklich? In der virtuellen Welt müssen wir kein echtes Bild von uns abgeben, sondern können unsere Bewegungen und Interaktionen auch auf einen Avatar übertragen der als Phantom unserer selbst nicht einmal Ähnlichkeit mit dem aufweisen muss, der ihm steuert. Die Telepräsenz unseres Phantoms erlaubt in der virtuellen Welt die Interaktion mit anderen Phantomen und dadurch eine erweiterte Form sozialer Kontakte.

Auf Wiedersehen im virtuellen Raum!

Literatur

1. Borges JL. Otras Inquisiciones. Other Inquisitions, 1937–1952 ... Translated by Ruth L.C. Simms. Introduction by James E. Irby. Austin: Zbuniversity of Texas Press; 1964.
2. Borges JL. Das Eine und die Vielen – Essays zur Literatur. München: Hanser; 1966.
3. Wilkins J. An essay towards a real character, and a philosophical language. London: Gellibrand & John Martyn; 1668.
4. Borges JL. Die analytische Sprache von John Wilkins. In: Hsu M, Herausgeber. f.fwd – reader. Zürich: ETH Zürich, Departement Architektur, Professur für CAAD; 2002. S. 13–8.
5. Foucault M. Die Ordnung der Dinge: Eine Archäologie der Humanwissenschaften. 24. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp; 2017.
6. Campos J, Bülthoff H. Multimodal integration during self-motion in virtual reality. The neural bases of multisensory processes. CRC Press; 2011. S. 603–28.

⁶Ein omni-direktionales Laufband (das sich auf der Ebene des Bodens in alle Richtungen bewegen kann [6].

Personenregister

Abovitz, Rony

Rony A. Abovitz (geb. 1971), amerikanischer Ingenieur, Gründer von Mako Surgical und Magic Leap

Adams, William

William Grylls Adams (1836–1915), britischer Physiker, Professor für Physik am Kings College in London, entdeckte mit Day den photoelektrischen Effekt

Adelson, Edward

Edward H. Adelson, (geb. 1952), amerikanischer Neurowissenschaftler, Professor für Vision Science am Massachusetts Institute of Technology

Aëtios

Aëtios von Amida (503–575), byzantinischer Mediziner in Alexandria und Medikus des römischen Kaisers Justinian in Konstantinopel

Agatharchos

Agatharchos (um 500 v. Chr.), griechischer Maler, wird von Vitruv als Autor einer Schrift zur Skenographie erwähnt, galt als „Schnellmaler“

Aglaophon

Aglaophon „der Jüngere“ (um 500 v. Chr.), Sohn des Aristophon, Enkel des Aglaophon „der Ältere“, wird von Plinius und Cicero gerühmt

Aguilonius, Franciscus

Franciscus Aguilonius, auch François d'Aguilon (1567–1617), belgischer Jesuit und Mathematiker

Aischylos

Aischylos, lat. Aeschylus (525 v. Chr. – 456 v. Chr.), griechischer Dichter, seine Tragödien (vor allem „Die Perser“ und „Die Orestie“) wurden auch in Deutsche übersetzt und werden bis heute aufgeführt

Akasaki, Isamu

Isamu Akasaki (geb. 1929), japanischer Ingenieurwissenschaftler, General Manager des Matsushita Research Laboratory, Professor für Elektronik an der Universität Nagoya sowie der Meijo University, Nobelpreis für Physik 2014 (gemeinsam mit Amano und Nakamura)

Alberti, Leon

Leon Battista Alberti (1404–1472), italienischer Kunst- und Architekturtheoretiker, besonders bekannt für seine theoretischen Schriften über die Malkunst und Bildhauerei

Alhazen

Abu Ali al-Hasan ibn al-Haitham, auch lat. Alhazen oder Alhacen (ca. 965–1040), arabischer Optiker und Astronom

Amano, Hiroshi

Hiroshi Amano (geb. 1960), japanischer Physiker, Professor an der Universität Nagoya, Nobelpreis für Physik 2014 (gemeinsam mit Akasaki und Nakamura)

Ames, Adelbert

Adelbert Ames Jr. (1880–1955), amerikanischer Physiologe, Professor für Physiologische Optik am Dartmouth College, Gründer des Dartmouth Eye Institute, bekannt für den Ames-Raum

Amidror, Isaac

Isaac (Itzhak) Amdidror (geb. 1953), Isrealisch-Schweizer Computerwissenschaftler, Moiré-Forscher an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Amosis

Ahmose I. (1560 v. Chr. – 1525 v. Chr.), Pharao der 18. Dynastie

Anaxagoras

Anaxagoras (499 v. Chr. – 428 v. Chr.), griechischer Philosoph, Lehrer des Perikles und Euripides

Anaximander

Anaximander, auch Anaximandros (610 v. Chr. – 547 v. Chr.), griechischer Philosoph, Schüler von Thales

Anaximenes

Anaximenes (585 v. Chr. – 524 v. Chr.), griechischer Philosoph und Naturbeobachter, gilt als Schüler des Anaximander

Anderton, John

John Anderton (1843–1905), englischer Optiker, insbesondere im Bereich Polarisation tätig

Anschütz, Ottomar

Ottomar Anschütz (1846–1907), deutscher Fotograf, Erfinder der Chronophotographie und des Elektrotachscops

Antiphilos

Antiphilos (um 330 v. Chr.), griechischer Maler, Zeitgenosse und Rivale des Apelles

Apelles

Apelles (ca. 375 v. Chr. – 300 v. Chr.), griechischer Maler, Schüler des Pamphilos, galt den Schriftstellern seiner Zeit als meisterhafter Maler

Archimedes

Archimedes von Syrakus (287 v. Chr. – 212 v. Chr.), griechischer Mathematiker und Naturwissenschaftler, bekannt u. a. für die Berechnung der Zahl Pi, die Hebelgesetze oder den statischen Auftrieb von Körpern

Ardenne, Manfred

Manfred Baron von Ardenne (1907–1997), deutscher Erfinder und Wissenschaftler, Professor an der TU Dresden, Gründer des Ardenne-Instituts, entwickelte (mit Loewe) die Radioröhre und das elektronische Fernsehen, an der Entwicklung der sowjetischen Atombombe beteiligt

Argand, Aimé

François Pierre Aimé Argand (1750–1803), Genfer Chemiker und Destillateur, erfand die Argand-Öllampe

Aristarchos

Aristarchos von Samos (310 v. Chr. – 230 v. Chr.), griechischer Astronom, Schüler des Straton von Lampsakos, nach Archimedes Vertreter eines heliozentrischen Weltbildes (mit der Sonne im Mittelpunkt)

Aristoteles

Aristoteles (384 v. Chr. – 322 v. Chr.), griechischer Philosoph und Naturforscher, Schüler des Platon; Lehrer Alexander des Großen, dem späteren König von Makedonien, einflussreicher Universalgelehrter und Theoretiker auf den Gebieten der Logik, Ethik, Rhetorik, Naturlehre und Erkenntnistheorie

Arndt, Ernst Moritz

Ernst Moritz Arndt (1769–1860), deutscher Schriftsteller, Historiker und Patriot, Professor in Greifswald und Bonn, Gründungsmitglied der Urburschenschaft in der Grünen Tanne in Jena

Artaud, Antonin

Antoine Marie Joseph Paul Artaud (1896–1948), französischer Schauspieler, Autor und Regisseur, Theoretiker des Theaters, Gründer des „Theaters der Grausamkeit“

Auer, Carl

Carl Auer von Welsbach (1858–1929), österreichischer Chemiker und Fabrikant, Erfinder und Produzent des Auer-Glühstrumpfs, erschuf den Markennamen OSRAM

Babbage, Charles

Charles Babbage (1791–1871), britischer Mathematiker, Professor für Mathematik an der Universität Cambridge, Inhaber des Lucasischen Lehrstuhls, Erfinder der Rechenmaschine „Difference Engine No. 1“

Baccei, Tom

Thomas J. Baccei (geb. 1944), amerikanischer Informatiker und Unternehmer, Gründer der Firma Pentica Systems, Autor des Bestsellers „Magic Eye“

Bach, Ludwig

Ludwig Bach (1865–1912), deutscher Ophthalmologe, Professor für Ophthalmologie in Marburg

Bacon, Roger

Roger Bacon (um 1220–1292), englischer Franziskaner und Naturphilosoph, verfasste Schriften zur Astronomie und Optik

Baer, Karl

Karl Ernst Ritter von Baer (1792–1876), deutsch-baltischer Mediziner, Professor in Königsberg

Baese, Carlo

Carlo Baese di Castelvecchio (1877–1943), italienischer Ingenieur, Erfinder einer Relieffotografie

Baird, John

John Logie Baird (1888–1946), schottischer Erfinder, berühmter Entwickler des Fernsehens

Baker, Henry

Henry Baker, Pseudonym „Henry Stonecastle of Northumberland“ (1698–1774), englischer Naturforscher, stiftete die „Bakerian Lecture“ der Royal Society

Balthasar, Theodor

Theodor Balthasar (um 1677 – nach 1721), deutscher Mediziner und Mathematiker, Professor an der Ritterakademie zu Erlangen; Stadtphysikus von Erlangen

Balzac, Honoré

Honoré de Balzac (1799–1850), französischer Schriftsteller, bekannt für seinen Romanzyklus „Die menschliche Komödie“

Bartholin, Erasmus

Erasmus Bartholin, auch Bartholinus (1625–1698), dänischer Wissenschaftler, Professor für Mathematik in Kopenhagen, untersuchte die Doppelbrechung

Beaman, Joe

Joseph J. Beaman (geb. ca. 1950), amerikanischer Ingenieur, Professor an der University of Texas, Mitbegründer von DTM

Beard, Terry

Terry D. Beard (geb. 1946), amerikanischer Ton- und Videoingenieur, Erfinder des Nuoptix-Verfahrens

Benton, Steve

Stephen Anthony Benton (1941–2003), amerikanischer Physiker, Entwickler bei Polaroid, Professor am Massachusetts Institute of Technology, forschte insbesondere auf dem Gebiet der Holografie, Erfinder des Regenbogenhologramms

Bergen, James

James R. Bergen (geb. um 1950), amerikanischer Mathematiker, Psychologe und Biophysiker, Forscher an den Bell Labs, bei RCA und Sarnoff

Bernanose, André

André Bernanose (1912–2002), französischer Chemiker und Physiker, Professor an der Universität Nancy

Bernauer, Ferdinand

Ferdinand Bernauer (1892–195) deutscher Mineraloge und Geologe, Professor für Mineralogie in Berlin, Erfinder des Zeiss-Polarisationsfilters „Bernotar“

Bernier, Robert

Robert V. Bernier (1911–1976), amerikanischer Offizier, Entwickler stereoskopischer Projektionsverfahren

Berthier, Auguste

Auguste Berthier (um 1850–1915) französischer Fotograf, beschrieb die Idee der Parallax-Barriere

Berthon, Rodolphe

Rodolphe Berthon (vermutl. geb. um 1880, gest. nach 1937), französischer Optiker und Astronom, Erfinder des Linsenrasterverfahrens in der Farbfotografie

Bertuch, Friedrich

Friedrich Johann Justin Bertuch (1747–1822), deutscher Übersetzer und Verleger, Geheimer Sekretär des Herzogs von Sachsen-Weimar-Eisenach, Initiator der fürstlichen freien Zeichenschule in Weimar, bekannt für sein reich illustriertes Bilderbuch für Kinder

Bettini, Mario

Mario Bettini, lat. Marius Bettinus (1582–1657), italienischer Mathematiker

Biard, James R.

James R. „Bob“ Biard (geb. 1931), amerikanischer Ingenieur, Forscher bei Texas Instruments, Chief Scientist bei Honeywell, Professor an der Texas A&M University

Bitzer, Donald

Donald L. Bitzer (geb. 1934), amerikanischer Ingenieur, Erfinder des Plasmabildschirms (gemeinsam mit Slottow und Wilson), Professor an der North Carolina University

Blanther, Joseph

Joseph E. Ritter von Blanther (1859–1898), österreichischer Offizier, Erfinder einer Schicht-Methode für 3D-Landkarten, wegen Mordes angeklagt

Boccacio, Giovanni

Giovanni Boccaccio (1313–1375), italienischer Schriftsteller, Verfasser des „Decamerone“

Bohr, Niels

Niels Bohr (1885–1962), dänischer Physiker, Professor an der Universität in Kopenhagen, entwickelte das „Bohrsche Atommodell“, Nobelpreis für Physik 1922

Bolas, Mark

Mark Bolas (geb. 1960), amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor für interaktive Medien an der University of Southern California (USC), Mitbegründer von Fake-space Labs

Bolt, Richard

Richard A. Bolt (geb. um 1940) amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor am Massachusetts Institute of Technology, Gründer des Human Interface Lab

Bolyai, Farkas

Farkas Wolfgang Bolyai (1775–1858), ungarischer Mathematiker, Vater von János Bolyai, Professor für Mathematik am Reformierten Kolleg (heute Liceul Vocational Reformat) in Neumarkt am Mieresch (heute Targu Mures), Freund von Gauß, forschte über das Parallelenaxiom Euklids

Bolyai, János

János (Johann) Bolyai (1802–1860), ungarischer Mathematiker, Sohn von Farkas Bolyai, entwickelte aus dem Parallelenaxiom Euklids ein nichteuklidische (hyperbolische) Raumgeometrie

Bonet, Juan

Juan Pablo Bonet (1573–1633), spanischer Staatsdiener, Sekretär und Verwalter der Familie Velasco, Sekretär des Königs Felipe IV.

Borchardt, Ludwig

Ludwig Borchardt (1863–1938), deutscher Ägyptologe und Architekt, Leiter der Ausgrabungen der Deutschen Orient-Gesellschaft 1911–1914

Borges, Jorge Luis

Jorge Francisco Isidoro Luis Borges Acevedo (1899–1986), argentinischer Schriftsteller und Philosoph, Direktor der argentinischen Nationalbibliothek, Mitbegründer des magischen Realismus

Born, Max

Max Born (1882–1970), Physiker, Professor für Physik in Frankfurt, Berlin und Göttingen, Freund Einsteins, Nobelpreis für Physik 1954

Botticelli

Sandro Botticelli, auch Sandro di Mariano di Vanni Filipepi, gen. Botticelli (1445–1510), italienischer Renaissancemaler, seine Motive sind häufig die griechische Mythologie oder biblischen Geschichte

Bouton, Charles

Charles Marie Bouton (1781–1853), französischer Maler, gemeinsam mit Daguerre Erfinder des Dioramas

Bower, Joseph

Joseph L. Bower (geb. 1938), amerikanischer Organisationstheoretiker, Professor in Harvard

Bowyer, Adrian

Adrian Bowyer (geb. 1952), britischer Ingenieur und Mathematiker, Dozent an der University of Bath, Entwickler des Open-Source-Druckers RepRap

Bradley, Milton

Milton Bradley (1836–1911), amerikanischer Spielenetwickler und Unternehmer, Gründer der Spielzeugfirma Milton Bradley Company (in Deutschland unter MB Spiele bekannt, heute zum Hasbro-Konzern gehörig)

Bragg, William Henry

Sir William Henry Bragg (1862–1942), britischer Physiker, Professor an der Universität of Adelaide (Australien), Leeds und London, erhielt gemeinsam mit seinem Sohn William Lawrence Bragg 1915 den Nobelpreis für Physik

Bragg, William Lawrence

Sir William Lawrence Bragg (1890–1971), britischer Physiker, Professor für Physik an den Universitäten Manchester und Cambridge, erhielt gemeinsam mit seinem Vater William Henry Bragg 1915 den Nobelpreis für Physik

Brahe, Tycho

Tyche Brahe, eigentl. Tyge Ottesen Brahe (1546–1601), dänischer Astronom, Hofmathematiker bei Kaiser Rudolph II. in Prag, beschrieb z. B. die Himmelserscheinungen Supernova und Komet, hinterließ umfangreiche Beobachtungsaufzeichnungen, die nach seinem Tod von seinem Assistenten Kepler ausgewertet wurden

Brandenburg-Schwedt, Friederike Charlotte

Friederike Charlotte von Brandenburg-Schwedt (1745–1808), Prinzessin von Preußen, Fürstäbtissin des Stiftes Herford, bekannt vor allem für ihren Briefwechsel mit Euler

Brandt, Willy

Willy Brandt, eigentl. Herbert Frahm (1913–1992), deutscher Politiker, SPD-Parteivorsitzender und 4. Bundeskanzler

Braun, Ferdinand

Karl Ferdinand Braun (1850–1918), deutscher Physiker, Lehrer für Physik in Leipzig, Professor für Physik in Marburg, Karlsruhe, Tübingen und Straßburg, Erfinder der Braunschen Röhre, Nobelpreis für Physik 1909 (gemeinsam mit Marconi)

Braunstein, Rubin

Rubin Braunstein (1922–2018), amerikanischer Physiker, Forscher bei RCA, Professor für Physik an der Universität von Kalifornien, Pionier der LED-Technik

Bravais, Auguste

Auguste Bravais (1811–1863), französischer Offizier und Naturforscher, Professor für Astronomie in Lyon, Professor für Physik in Paris, definierte die Kristalle über Gittersysteme

Brewster, David

Sir David Brewster (1781–1868), britischer Physiker, Professor für Physik an der Universität St. Andrews, Prinzipal der Universität Edinburgh, Entdecker des Brewster Winkels, Erfinder des Kaleidoskops und des Linsenstereoskops, Biograph Newtons

Broderick, Damien

Damien Francis Broderick (geb. 1944), australischer Literaturwissenschaftler und Schriftsteller, Science-Fiction Autor

Brown, Glenn

Glenn Halstead Brown, (1915–1995), amerikanischer Chemiker, Professor für Chemie an der Kent State University, Gründer des „Liquid Crystal Institute“

Brunelleschi, Filippo

Filippo Brunelleschi (1377–1446), italienischer Architekt und Bildhauer, Architekt der Kuppel des Domes in Florenz, bekannt für die geometrische Konstruktion der Perspektive und deren Anwendung in der Architektur und Malerei

Buffon, Georges-Louis

Georges-Louis Leclerc de Buffon, eigentl. Georges-Louis Leclerc (1707–1788), französischer Naturforscher und Botaniker, Direktor des Königlichen Botanischen Gartens in Paris, verfasste einige Werke zur Naturgeschichte

Burton, Robert

Robert Preece Burton (geb. ca. 1946), amerikanischer Physiker, Professor an der Brigham Young University, Gründer der Hyperdimensional Research Group

Buti, Ludovico

Ludovico Buti, auch Lodovico di Tommaso Buti (um 1550–1613), italienischer Maler, Schüler des Santi di Tito (Titi)

Carmack, John

John D. Carmack II (geb. 1970), amerikanischer Spieleentwickler, Mitbegründer von id-Software, bekannt für die Spiele Wolfenstein und Doom, CTO von Oculus

Celsus, Aulus Cornelius

Aulus Cornelius Celsus (um 25 v. Chr. – um 50 n. Chr.), römischer Medizinschriftsteller

Chairephon

Chairephon von Sphettos (470 v. Chr. – 399 v. Chr.), griechischer Philosoph, Schüler des Sokrates

Chartres, Bernhard

Bernhard von Chartres, lat. Bernardus Carnotensis (um 1075–1126), französischer Philosoph, Kanzler der Domschule von Chartres

Childe, Henry

Henry Langdon Childe (1781–1874), englischer Bühnenkünstler, bekannt für seine Shows mit Überblendungen durch mehrere Projektoren

Christensen, Clayton

Clayton M. Christensen (geb. 1952), amerikanischer Wirtschaftswissenschaftler, Professor in Harvard

Christison, Robert

Sir Robert Christison (1797–1882), schottischer Arzt und Toxikologe, Professor für medizinisches Recht und Medizin in Edinburgh, Präsident der Royal Society of Edinburgh

Cicero

Marcus Tullius Cicero (106 v. Chr. – 63 v. Chr.), römischer Philosoph, Politiker und berühmter Redner, gilt als stilistisches Vorbild der klassischen lateinischen Sprache

Cimabue

Cenni di Pepo, Spitzname Cimabue (1240–1302), italienischer Maler, möglicherweise der Lehrer Giottos

Clarke, Arthur

Sir Arthur Charles Clarke (1917–2008), britischer Physiker und Schriftsteller, Vordenker geostationärer Satelliten, Science-Fiction Autor

Clarke, Edward

Edward Marmaduke Clarke (1830–1850), irischer Instrumentenbauer, Mitbegründer der London Electrical Society, Schöpfer des Royal Panopticon of Science and Art

Clarke, John

John Mason Clarke (1857–1925), amerikanischer Geologe und Paläontologe, Professor für Geologie und Mineralogie am Rensselaer Polytechnic Institute (New York), Präsident der Geological Society of America

Clarkson, Euan

Euan Neilson Kerr Clarkson (geb. 1937), britischer Paläontologe, Professor für Paläontologie an der Universität Edinburgh

Claudet, Antoine

Antoine François Jean Claudet (1797–1867), Fotograf und Daguerreotypist, fotografierte viele bekannte Persönlichkeiten seiner Zeit, Erfinder des Stereomonoskops

Clemens von Alexandria

Titus Flavius Clemens oder Clemens Alexandrinus (150–215), griechischer Theologe und Schriftsteller, Verfasser der „Stromateis“

Clottes, Jean

Jean Clottes (geb. 1933), französischer Archäologe, Professor und Generalinspektor für Archäologie sowie wissenschaftlicher Berater für prähistorische Felsenkunst am französischen Kulturministerium, untersuchte u. a. die Höhle von Chauvet

Colbert, Jean-Baptiste

Jean-Baptiste Colbert, Marquis de Seignelay (1619–1683), französischer Politiker, Finanzminister unter Ludwig dem XIV., Initiator der französischen Akademie der Wissenschaften

Colt, Samuel

Samuel Colt (1817–1862), amerikanischer Waffenhersteller, erfand eine Pistole mit Drehzylinder, die nach ihm „Colt“ genannt wird

Commandino, Federico

Federico Commandino, lat. Federicus Commandinus (1506–1575), italienischer Übersetzer antiker Mathematiker, Privatsekretär Papst Clemens VII.

Conard, Nicholas

Nicholas John Conard (geb. 1961), amerikanischer Archäologe, Professor für Ur- und Frühgeschichte in Tübingen, gilt als Entdecker der Venus vom Hohlefels und des Mammuts vom Vogelherd

Constantinus

Constantinus Africanus, auch Konstantin der Afrikaner (1020–1087), nordafrikanischer Benediktiner, Mediziner und Übersetzer

Cormack, Allan

Allan MacLeod Cormack (1924–1998), südafrikanisch-amerikanischer Physiker, Theoretiker der Röntgentomografie, Professor an der Tufts University, Nobelpreis für Medizin 1979 gemeinsam mit Godfrey Hounsfield

Cross, Lloyd

Lloyd Gerald Cross (1935–2015), amerikanischer Physiker und Holografie-Künstler, Erfinder der Multiplex-Hologramme, Mitbegründer der Multiplex Company, Mitbegründer „School of Holography“ (beides mit Fred Unterseher), bekanntestes Werk ist sein Multiplex-Hologramm „The Kiss“

Crump, S. Scott

Steven Scott Crump (geb. 1953), amerikanischer Ingenieur, Gründer von StrataSys, Erfinder des FDM-Drucks

Cuff, John

John Cuff (1708–1772), englischer Optiker und Instrumentenbauer, bekannt besonders für seine Mikroskope

Curtze, Maximilian

Ernst Ludwig Wilhelm Maximilian Curtze (1837–1903), deutscher Mathematikhistoriker und Kopernikusforscher, Gymnasialprofessor in Thorn (Geburtsstadt des Kopernikus)

Czermak, Johann

Johann Nepomuk Czermak (1828–1873), österreichischer Physiologe, Professor für Physiologie in Graz, Schüler von Purkinje

d'Arcy, Patrick

Patrick d'Arcy (1725–1779), irisch-französischer Mathematiker und Offizier, Präsident der Académie Royale des Sciences, Marechal des camp in der königlichen Armee, Entdecker des Drehimpulses sowie der Nachbildungswirkung

da Fabriano, Gentile

Gentile da Fabriano (1370–1427), italienischer Maler, bekannt für realistische Malerei z. B. im Bild „Die Anbetung der Könige“

da Vinci, Leonardo

Leonardo da Vinci (1452–1519), italienischer Maler und Gelehrter, seine zahlreichen Erfindungen und außergewöhnlichen Kunstwerke haben ihm den Beinamen „Universalgenie“ eingebracht

Daguerre, Louis

Louis Jacques Mandé Daguerre (1787–1851), französischer Maler, Pionier der Fotografie

d'Almeida, Joseph-Charles

Joseph-Charles d'Almeida (1822–1880), französischer Physiker, Professor für Physik am Lyzeum von Algier, Gründer des Journals für Physik, gilt gemeinsam mit Rollmann als Entdecker des Anaglyphenverfahrens

Damianos

Damianos von Larissa (um 400 n. Chr.), griechischer Autor einer Schrift über Optik, möglicherweise Sohn oder Schüler des Heliodorus

Dante

Dante Alighieri (1265–1321), italienischer Dichter, schrieb die „Göttliche Komödie“

Darwin, Charles

Charles Robert Darwin (1809–1882), englischer Naturforscher und Forschungsreisender, sein Hauptwerk „Über die Entstehung der Arten“ gilt als Beginn der naturwissenschaftlichen Evolutionstheorie

Day, Richard

Richard Evan Day (1848–1929), englischer Physiker, Dozent am Kings College in London, entdeckte mit Adams den photoelektrischen Effekt

de Bois-Clair, Gaspar

Gaspar Antoine de Bois-Clair (1654–1704), französischer Maler

de Caus, Salomon

Salomon de Caus, auch de Caux u. ä. (1576–1626), französischer Architekt und Ingenieur, Baumeister Friedrichs von der Pfalz in Heidelberg, Erbauer von Parks und Erfinder verschiedener Automaten

de Fontana, Johannes

Johannes de Fontana, auch Giovanni da Fontana (1395–1455), italienischer Arzt und Autor, Stadtarzt von Udine

de Monconys, Baltasar

Baltasar de Monconys (1611–1665), französischer Diplomat, verfasste Reiseberichte

de Montebello, Roger

André Roger Lannes, Herzog von Montebello (1908–1986), französischer Fotograf und Erfinder

Dechales, Claude

Claude François Milliet Dechales (1621–1678), französischer Jesuit und Mathematiker, Professor für Mathematik in Lyon

Deckard, Carl

Carl R. Deckard (geb. 1961), amerikanischer Ingenieur und Geschäftsmann, Erfinder des 3D-Lasersinterns, Mitbegründer von DTM (übernommen von 3D Systems), Mitbegründer von Structured Polymers (übernommen von Evonik)

Dee, John

John Dee (1527–1608), englischer Mathematiker und Astrologe, Berater von Königin Elisabeth I.

DeFanti, Tom

Thomas Albert DeFanti (geb. 1948), amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor an der University of Illinois at Chicago, gemeinsam mit Sandin Gründer des Electronic Visualization Laboratory

della Francesca, Piero

Piero della Francesca, auch Petrus Pictor Burgensis oder nur Piero (um 1410–1492) italienischer Maler und Kunsttheoretiker, Lehrer des Luca Pacioli (ein Lehrer Da Vincis)

della Porta, Giovanni

Giovanni (auch Giambattista) Battista della Porta, auch Johann Baptista Porta (1535–1615), italienischer Arzt und Gelehrter, verfasste die „Magia naturalis“ ein umfangreiches Werk zur Magie und den Naturgeheimnissen

Demokrit

Demokrit von Abdera, auch Demokritos (459 v. Chr. – 371 v. Chr.), griechischer Philosoph, Schüler des Leukipp, mit Leukipp Begründer des Atomismus

Denisyuk, Yiri

Yuri Nikolaevich Denisyuk (1927–2006), russischer Physiker, Professor und Leiter des Holografie-Labors am Wawilow-Institut für Optik, Erfinder der Weißlichthologramme

Descartes, René

René Descartes, lat. Renatus Cartesius (1596–1650), französischer Philosoph und Mathematiker, das kartesische Koordinatensystem ist nach ihm benannt

Destriau, Georges

Georges Destriau (1903–1960), französischer Physiker, Professor an der Sorbonne in Paris, Entdecker der Elektro-Photolumineszenz

di Banco, Maso

Maso di Banco (um 1300–1348), italienischer Maler, bekannt für sein Fresko über das Leben des heiligen Silvester (Papst Silvester I.)

Dibutades

Dibutades von Sikyon, auch Butades (vielleicht 600 v. Chr.), griechischer Töpfer und Plastiker, Erfinder der Schattenprojektion

Dickson, William

William Kennedy Laurie Dickson (1860–1935), schottisch-amerikanischer Ingenieur, Assistent Edisons, Erfinder des Kinetoskops, Filmproduzent

DiMatteo, Paul

Paul L. DiMatteo (geb. 1928), amerikanischer Ingenieur und Erfinder, Manager von Dynell Electronics, Robotic Vision, Vivax Medical und Nextek

Diogenes

Diogenes von Apollonia (um 500. v. Chr.), griechischer Arzt und Philosoph, verfasste eine Schrift über die Natur, in der Luft ein mit Geisteskraft ausgestatteter, göttlicher Urstoff ist

Dircks, Henry

Henry Dircks (1806–1873) britischer Ingenieur, Erfinder der „Dircksschen Fantasmagorie“ (später Pepper's ghost)

Döbler, Ludwig

Leopold Ludwig Döbler (1801–1864), österreichischer Physiker und Magier, Erfinder des Phantaskops

Dolgoff, Gene

Eugene Dolgoff (geb. 1950), amerikanischer Ingenieur und Erfinder, Entwickler von LC-Projektionslösungen

Donatello

Donatello, Donato di Niccolò di Betto Bardi (1386–1466), italienischer Bildhauer, zunächst Gehilfe Ghibertis, später als Bildhauer bekannt für den Realismus seiner Figuren

Dörpfeld, Wilhelm

Wilhelm Dörpfeld (1853–1940), deutscher Architekt und Archäologe, Professor an der Universität Jena, Ausgrabungen in Olympia, auf der Akropolis und mit Schliemann in Troja

Dove, Heinrich

Heinrich Wilhelm Dove (1803–1879), deutscher Physiker und Meteorologe, Professor für Physik in Königsberg und Berlin, Erfinder des Dove-Prismas

Drexler, Franz

Franz Drexler (geb. um 1880 – gest. unbek.), deutscher Ingenieur und Flugzeugführer, Wegbereiter automatischer Flugsteuerungen

Drummond, Thomas

Thomas Drummond (1797–1840), britischer Offizier und Vermessungsingenieur, britischer Untersekretär für Irland, Erfinder des Kalklichts

du Hauron, Louis

Louis Arthur Ducos du Hauron (1837–1920), französischer Forscher und Erfinder, Pionier der Farbfotografie

Duboscq, Jules

Jules Duboscq (1817–1886), französischer Optiker und Fotograf, insbesondere Stereofotograf

Dudley, Leslie

Leslie Peter Dudley (1905–1998), britisch-amerikanischer Autor und Erfinder, Entwickler zahlreicher Geräte für das stereoskopische Kino

Dudnikov, Yuri

Yuri Anatoljewitsch Dudnikov, (unbek., vermutl. geb. um 1930) sowjetischer Wissenschaftler, Autor von Schriften zur Autostereoskopie, häufig gemeinsam mit Boris Rozhkov

Dumas, Alexandre

Alexandre Dumas der Ältere, auch Alexandre Dumas Davy de la Pailleterie (1802–1870), französischer Schriftsteller, bekannt für seine Romane „Die drei Musketiere“ und „Der Graf von Monte Christo“

Dürer, Albrecht

Albrecht Dürer (1471–1528), deutscher Maler und Kunsttheoretiker, mit seinen naturgetreuen Grafiken und Gemälden gehört er zu den herausragenden Renaissancemalern, bemerkenswert ist auch sein Mathematikbuch „Underweysung der Messung mit dem Zirckel und Richtscheit“

Dvořák, Max

Max Dvořák (1874–1921), tschechischer Kunsthistoriker, Professor für Kunstgeschichte an der Universität Wien

Eames, Charles und Ray

Charles Ormond Eames, Jr. (1907–1978) und Bernice Alexandra „Ray“ Kaiser Eames (1912–1988), amerikanische Designer, u. a. des bekannten Eames Lounge Chair

Ebers, Georg

Georg Moritz Ebers (1837–1898), deutscher Ägyptologe, Professor für Ägyptologie in Jena und Leipzig, Verfasser historischer Romane und Herausgeber illustrierter populärwissenschaftlicher Bildbände

Eddington, Arthur

Sir Arthur Stanley Eddington (1882–1944), britischer Astronom und Physiker, forschte und publizierte über Relativitätstheorie, Professor für Astronomie in Cambridge, Direktor des Cambridge Observatoriums

Edison, Thomas

Thomas Alva Edison (1847–1931), amerikanischer Erfinder und Geschäftsmann, war an mehr als 1000 Erfindungen beteiligt, erfand u. a. den Phonographen, die Glühlampe und das Kinetoskop

Ehrenberg, Christian

Christian Gottfried Ehrenberg (1795–1876), Professor an der Friedrich-Wilhelm-Universität in Berlin (heute Humboldt-Universität) und Protozoologe, Reisebegleiter der Russlandexpedition Alexander Humboldts (1829)

Ehrenberger, Bonifacius

Bonifacius Heinrich Ehrenberger (1681–1759), Professor für Mathematik und Logik am Gymnasium Hildburghausen und Professor für Mathematik und Metaphysik am Gymnasium Coburg

Eichenlaub, Jesse

Jesse B. Eichenlaub, (geb. 1955) amerikanischer Physiker und Erfinder, 3D-Display-Entwickler, CTO bei Dimension Technologies in Rochester New York

Einstein, Albert

Albert Einstein (1879–1955), deutscher Physiker, Lehrer für Mathematik und Physik, technischer Experte am Schweizer Patentamt, Professor für Physik in Zürich, Prag und Princeton, Nobelpreis für Physik 1921, bekannt für die Relativitätstheorie

Eisler, Paul

Paul Eisler (1907–1992), österreichischer Ingenieur, Erfinder der gedruckten Schaltung

Empedokles

Empedokles (495 v. Chr. – 435 v. Chr.), griechischer Naturphilosoph und Redner, galt Aristoteles als Erfinder der Rhetorik

Epikur

Epikur, auch Epikouros (341 v. Chr. – 271 v. Chr.), griechischer Philosoph, Schüler des Pamphiles, Lehrer des Hermachos, Begründer der Epikureischen Schule

Erasistratos

Erasistratos (305 v. Chr. – 250 v. Chr.), griechischer Arzt und Anatom, Schüler des Pythagoras

Estanave, Eugène

Eugène Pierre Estanave (1867 – ca. 1936) französischer Mathematiker und Erfinder, Vize-Sekretär der „Société Mathématique de France“, Mitarbeiter im Laboratorium v. Lippmann an der Sorbonne, Entwickler des stereoskopischen Röntgens

Eugenius

Eugenius von Palermo, auch Eugenius Amiratus oder Eugenio Panormitano (1130–1203), griechischer Übersetzer und Schriftsteller, Ammiratus (Admiral oder Emir) des Königreiches von Sizilien

Euklid

Euklid von Alexandria, Eukleides, lat. Euclides (um 300 v. Chr.), griech. Mathematiker, berühmt für seine Werke zur Mathematik und Optik

Euler, Leonhard

Leonhard Euler (1707–1783), Schweizer Mathematiker und Physiker, Professor für Physik und Mathematik in Petersburg, Namensgeber der Eulerschen Zahl e

Exner, Sigmund

Siegmund Ritter Exner von Ewarten (1846–1926), österreichischer Physiologe, Professor am Physiologischen Institut in Wien

Faraday, Michael

Michael Faraday (1791–1867), britischer Naturforscher, Experimentalphysiker, Professor für Chemie an der Royal Institution, bekannt durch zahlreiche Entdeckungen zur Elektrizität, die Einheit der elektrischen Kapazität heißt nach ihm „Farad“

Faris, Sadeg

Sadeg M. Faris (geb. 1945), amerikanischer Ingenieur und Unternehmer, Gründer von Reveo

Ferguson, James

James Ferguson (1934–2008) amerikanischer Physiker und Erfinder, forschte bei Westinghouse zu Flüssigkeitskristallen, Gründer des LC-Herstellers ILIXCO (heute LXD)

Fisher, Scott

Scott Fisher (geb. 1951), amerikanischer Ingenieur, Leiter des „Virtual Environment Workstation Project“ (VIEW) der NASA, Professor für interaktive Medien an der University of Southern California, (USC)

Fitton, William

William Henry Fitton (1780–1861), britischer Mediziner und Geologe, Mitglied der Royal Society und Präsident der Geological Society of London

Flaubert, Gustave

Gustave Flaubert (1821–1880), französischer Schriftsteller, bekannt für seinen Roman „Madame Bovary“

Foucault, Michel

Michel Foucault (1926–1984), französischer Philosoph und Psychologe, Professor für Geschichte der Denksysteme am Collège de France

Frank, Charles

Sir Frederick Charles Frank (1911–1998), britischer Physiker, Professor an der Universität Bristol, insbesondere auf dem Gebiet der Kristallforschung aktiv

Fraunhofer, Joseph

Joseph Ritter von Fraunhofer (1787–1826), deutscher Optiker, Professor des physikalischen Kabinetts der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Namensgeber der der Fraunhofer-Gesellschaft

Fresnel, Augustin

Augustin Jean Fresnel (1788–1827), französischer Physiker und Optiker, forschte zur Wellennatur des Lichtes, Entwickler der nach ihm benannten Fresnellinse

Frisch, Karl

Karl Ritter von Frisch (1886–1982), deutsch-österreichischer Zoologe, Professor für Zoologie an der Universität München, Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 1973 (gemeinsam mit Konrad Lorenz und Nikolaas Tinbergen) für die Entdeckungen sozialer Verhaltensmuster bei Bienen

Frisius, Gemma

Gemma R. Frisius, eigentl. Jemme Reinerszoon (1508–1555), friesischer Mathematiker, Astronom und Instrumentenbauer, Professor für Medizin und Mathematik an der Universität Löwen

Fröhlich, Bernd

Bernd Fröhlich (geb. 1962), deutscher Informatiker, Professor an der Bauhaus Universität Weimar

Gaarder, Jostein

Jostein Gaarder (geb. 1952), norwegischer Schriftsteller, besonders bekannt mit dem philosophischen Jugendbuch „Sofies Welt“

Gábor, Dennis

Dennis Gábor (1900–1979), ungarisch-britischer Ingenieur, Entwickler bei Siemens & Halske in Berlin und Thomson-Houston in Rugby, Professor für Physik am Imperial College in London, Nobelpreis für Physik 1971

Gaddi, Taddeo

Taddeo Gaddi, auch Taddeo Gherardo di Zanobi (1290–1366), italienischer Maler, Sohn des Gaddo Gaddi, Patenkind des Giotto

Galen

Galenos von Pergamon, lat. Aelius Galenus od. Galienus (128–199), griechischer Arzt und Anatom, Leibarzt des Commodus

Galilei, Galileo

Galilei Galileo (1564–1641), italienischer Astronom und Mathematiker, Professor für Mathematik in Padua, Hofmathematiker der Medicis in Florenz, Vertreter des heliozentrischen Weltbildes, verbesserte das Teleskop zur Himmelsbeobachtung

Gauß, Carl Friedrich

Johann Carl Friedrich Gauß (1777–1855), deutscher Mathematiker und Physiker, Professor an der Universität in Göttingen, bekannt für mathematische Lösungen und Beschreibungen physikalischer Phänomene, nichteuklidische Geometrie und Geodäsie

Gautier, Théophile

Théophile Gautier (1811–1872), französischer Schriftsteller, schrieb mit „Avatar“ ein Buch über den Seelentausch

Gershon, Levi

Levi ben Gershon, auch Gersonides, Leo de Balneolis, Ralbag (als Abkürzung für Rabbi Levi Ben Gershon) oder Leo Hebraeus (1288–1344), jüdischer Mathematiker und Religionsgelehrter

Gershun, Andrej

Andrej Aleksandrovich Gershun (1903–1952), russischer Physiker, Professor an der Leningrader Fachschule für Feinmechanik und Optik (heute Staatliche Universität für Informationstechnologien, Mechanik und Optik Sankt Petersburg ITMO)

Ghiberti, Lorenzo

Lorenzo Ghiberti (1378–1455), italienischer Reliefbildhauer, Architekt und Schriftsteller, als Meisterleistung gilt seine Paradiespforte am Baptisterium des Domes von Florenz, verfasste mit den „Commentarii“ ein Buch über die Kunst

Giltisch, Adolf

Adolf Giltisch (1852–1911), Lithograph in Jena

Ginsberg, Carol

Carol Marsha Ginsberg Brown (geb. 1951), amerikanische Ingenieurin und Designerin

Giotto

Giotto di Bondone (1267–1337), italienischer Maler und Architekt, möglicherweise Schüler des Cimabues, Baumeister am Dom von Florenz, berühmter Renaissancemaler

Glaukon

Glaukon von Athen (428 v. Chr. – 382 v. Chr.), griechischer Schriftsteller, Bruder des Platon, bekannt vornehmlich aus den Dialogen Platons

Gleichen-Rußwurm, Wilhelm Friedrich

Wilhelm Friedrich Freiherr von Gleichen-Rußwurm, auch genannt „Rußwurm“ (1717–1783), deutscher Offizier und Naturforscher, Mikroskopiker

Gmelin, Philipp

Philipp Friedrich Gmelin (1721–1768), deutscher Arzt und Botaniker, Stadtphysikus von Tübingen, Professor für Botanik und Chemie

Goethe, Johann Wolfgang

Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832), deutscher Dichter, gilt mit seinem umfangreichen Werk als einer der bedeutendsten deutschen Schriftsteller, verfasste auch einige Beiträge zur Naturforschung (z. B. zur Metamorphose der Pflanzen und Tiere oder zur Farbenlehre)

Goldstein, Bernard

Bernard R. Goldstein (geb. 1938), amerikanischer Wissenschaftshistoriker, Professor und Direktor der „Jewish Studies“ an der Universität von Pittsburgh

Gortler, Steven

Steven S. Gortler (geb. 1959), amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor für Computerwissenschaften an Harvard

Gould, Gordon

Gordon Gould (1920–2005), amerikanischer Physiker, Professor an der Polytechnic University of New York, Gründer von Optelecom, Miterfinder und Namensgeber des Lasers

Gould, Stephen

Stephen Jay Gould (1941–2002), amerikanischer Paläontologe und Evolutionsbiologe, Professor an der Harvard University

Govi, Gilberto

Gilberto Govi (1826–1889), italienischer Physiker, Professor für Physik in Turin, Vertreter Italiens in der internationalen Meterkommission

Gray, George

George William Gray (1926–2013), britischer Chemiker, Professor für Chemie an der Universität in Hull, einflussreicher Forscher auf dem Gebiet der Flüssigkristalle

Griendel, Johann

Johann Franz Griendel (von Ach auf Wankhausen), auch Gründel oder Grindelius (1631–1687), deutscher Optiker, Nürnberger Hersteller von Projektoren und Mikroskopen

Grimes, Gary

Gary J. Grimes (geb. 1948), amerikanischer Physiker, Forscher an den Bell Labs, Professor für Telekommunikation an der University of Alabama at Birmingham (UAB)

Gropius, Karl

Karl Wilhelm Gropius (1793–1870), deutscher Maler, Schüler Schinkels, Landschafts-, Dekorations-, Dioramen und Theatermaler,

Gullstrand, Allvar

Allvar Gullstrand (1862–1930), schwedischer Augenarzt, Professor für physikalische und physiologische Optik an der Universität Uppsala, Nobelpreis für Medizin 1911

Gyges

Gyges (vor 680 v. Chr. – 644 v. Chr.), König von Lydien, sagenumwobener Gründer einer Königsdynastie, die mit Krösus unterging, benutzte einen unsichtbarmachenden Ring zur Verführung der Königin und Machtergreifung

Haeckel, Ernst

Ernst Heinrich Philipp August Haeckel (1834–1919), deutscher Mediziner und Zoologe, Professor für Zoologie an der Universität Jena

Hales, Thomas

Thomas Callister Hales (geb. 1958), amerikanischer Mathematiker, Professor an der University of Michigan, bekannt für seinen umfangreichen Computerbeweis der Keplerschen Vermutung im Nachgang zu Hsiangs Versuch eines Computerbeweises

Hamilton, William

Sir William Rowan Hamilton (1805–1865), irischer Mathematiker, Professor für Astronomie am Trinity College in Dublin, Erfinder der Quaternionen

Hammond, Laurens

Laurens Hammond (1895–1973), amerikanischer Erfinder, bekannt für die Hammond-Orgel

Hanrahan, Pat

Patrick „Pat“ Hanrahan (geb. 1955), amerikanischer Biophysiker und Computerwissenschaftler, Mitbegründer von Tableau Research (heute zu Salesforce), Professor für Computerwissenschaften in Stanford, gewann insgesamt 3 Oscars für seine Arbeiten im Rendering

Harrison, Lee

Lee Harrison III (1929–1998) amerikanischer Ingenieur, Gründer der Computer Image Corporation, Emmy Award für die Scanimate-Technik

Harsdörffer, Georg

Georg Philipp Harsdörffer (1607–1658), deutscher Jurist und Dichter, heute noch bekannt für die „Eindeutschungen“ fremdsprachiger Begriffe

Hauslab, Franz

Franz Ritter von Hauslab (1798–1883), österreichischer Offizier und Kartograf, General und Artillerie-Direktor im Kriegsministerium, Professor der Situations-Zeichnung an der k. k. Ingenieur-Akademie, Lehrer von Kaiser Franz Joseph I.

Haüy, René-Just

René-Just Haüy (1743–1822), französischer Naturforscher, Priester, Lehrer und Botaniker, Professor für Mineralogie an der École des mines de Paris, beschäftigte sich mit dem Aufbau von Kristallen

Hawker, Lanoe

Lanoe George Hawker (1890–1916), britischer Offizier und Pilot, gestorben beim Luftkampf mit Manfred von Richthofen, Entwickler des Flugsimulators „Rocking Nacelle“

Heilig, Morton

Morton Leonard Heilig (1926–1997), amerikanischer Filmschaffender, Pionier der virtuellen Realität

Heilmeier, George

George Harry Heilmeier (1936–2014), amerikanischer Ingenieur und Manager, Direktor der DARPA, CTO von Texas Instruments

Heinlein, Robert

Robert Anson Heinlein (1907–1988), amerikanischer Schriftsteller, Science-Fiction-Autor

Hekataios

Hekataios von Milet (560 v. Chr. – 480 v. Chr.), griechischer Forschungsreisender und Historiker, beschrieb in seinem Reisebericht die bekannte Welt, verbesserte die Weltkarte des Anaximander und verfasste das erste griechische Geschichtsbuch

Helfrich, Wolfgang

Wolfgang Helfrich (geb. 1932), deutscher Physiker, Professor für Physik an der Freien Universität Berlin, Forscher bei RCA und La Roche im Bereich Flüssigkristalle

Helmholtz, Hermann

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894), deutscher Physiologe und Physiker, Professor für Physiologie in Berlin, Königsberg und Heidelberg, zuletzt Professor für Physik an der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin (heute Humboldt-Universität)

Heraklit

Heraklit von Ephesos (520 v. Chr. – 460 v. Chr.) griechischer Philosoph und Historiker, seine Philosophie des Wandels (vom Entstehen und Vergehen der Dinge) wird gern im Spruch „panta rhei“ (alles fließt) zusammengefasst

Herapath, William

William Bird Herapath (1820–1868), britischer Mediziner und Chemiker, Entdecker des künstlichen Turmalins

Herder, Johann Gottfried

Johann Gottfried von Herder (1744–1803), Dichter der „Weimarer Klassik“, die heute als die Zeit des Wirkens von Herder, Goethe, Schiller und Wieland verstanden wird

Hering, Ewald

Karl Ewald Konstantin Hering (1834–1918), deutscher Physiologe, Professor für Physiologie in Wien und Prag, forschte insbesondere über den Sehsinn

Herophilus

Herophilus von Chalkedon (325 v. Chr. – 255 v. Chr.), Schüler des Praxagoras

Herschel, John

Sir John Frederick William Herschel (1792–1871), britischer Astronom, Mitbegründer der Royal Astronomical Society, Sohn von Wilhelm Herschel, dem Entdecker des Uranus

Hesiod

Hesiod, auch Hesiodios (um 700 v. Chr.), griechischer Dichter, schrieb in der „Theogonie“ über die Entstehung der Götter und der Welt (eine der ältesten Quellen der griechischen Mythologie) und beschreibt im Gedicht „Werke und Tage“ u. a. die Büchse der Pandora und die Legende von Prometheus

Hess, Walter

Walter Rudolf Hess (1881–1973), Schweizer Ophthalmologe und Physiologe, Professor an der Universität Zürich, Leiter des Physiologischen Institutes, Nobelpreis für Medizin 1949

Hillebrand, Franz

Franz Hillebrand (1863–1926), österreichischer Philosoph und Psychologe, Professor an der Universität Innsbruck, Gründer des Instituts für experimentelle Psychologie

Hirschberg, Julius

Julius Hirschberg (1843–1925), deutscher Augenarzt, Professor an der Universität Berlin, die Vereinigung zur Geschichte der Augenheilkunde „Julius-Hirschberg-Gesellschaft“ ist nach ihm benannt

Holbein, Hans

Hans Holbein der Jüngere (1497–1543), deutscher Maler

Holmes, Richard

Richard „Dick“ B. Holmes (geb. um 1940), amerikanischer Ingenieur, Gründer von Electronic Imaging Systems

Holonyak, Nick

Nick Holonyak (geb. 1928), amerikanischer Ingenieur, Forscher bei den Bell Telephone Laboratories und General Electric, Professor an der University of Illinois, gilt als Erfinder der roten Leuchtdiode

Homer

Homer (nach 850 v. Chr. – vor 750 v. Chr.), griechischer Dichter, Schöpfer der Ilias und der Odyssee

Hooke, Robert

Robert Hooke (1635–1703), englischer Gelehrter, Professor für Geometrie am Gresham College in London, Experimentator der Royal Society, Astronom, Optiker und Mikroskopiker

Hopkinson, Francis

Francis Hopkinson (1737–1791), amerikanischer Jurist und Politiker, Schriftsteller und Komponist, Richter, Unterzeichner der Unabhängigkeitserklärung

Horner, William George

William George Horner (1768–1837), englischer Mathematiker und Lehrer, schuf eine Verfahren zur Lösung von Gleichungen (Horner-Schema), entwickelte eine Beschreibung des Daedalum

Hounsfield, Godfrey

Sir Godfrey Newbold Hounsfield (1919–2004), englischer Ingenieur, Entwickler bei den EMI Laboratories, Erfinder der Computertomographie, Nobelpreis für Medizin 1979 gemeinsam mit Allan Cormack

Hsiang, Wu-Yi

Wu-Yi Hsiang (geb. 1937), chinesischer (taiwanesischer) Mathematiker, Professor an der University of California, bekannt für seinen Versuch eines Computerbeweises der Kepferschen Vermutung

Hueck, Alexander

Alexander Friedrich von Hueck (1802–1842), deutsch-baltischer Mediziner, Professor für Medizin an der Universität Dorpat (Estland)

Hull, Chuck

Charles W. Hull (geb. 1939), amerikanischer Ingenieur, Erfinder und Unternehmer, Gründer und Präsident von 3D-Systems

Hunain

Abu Zaid Hunain ibn Ishaq al-Ibadi, auch Hunain ibn Ishaq od. lat. Johannitius (808–873), christlich-arabischer Gelehrter und Übersetzer, Leiter des Hauses der Weisheit in Bagdad

Huxley, Aldous

Aldous Leonard Huxley (1894–1963), britischer Schriftsteller, schrieb den Bestseller „Schöne neue Welt“

Huygens, Christiaan

Christiaan Huygens (1629–1695), niederländischer Optiker, Physiker und Astronom, formulierte eine Wellentheorie des Lichtes

Ivanov, Semyon

Semyon Pavlovich Ivanov (1906–1972) russischer Ingenieur, Forscher am Allunions-institut für Fotokinotechnik (NIKFI), Erfinder des Moskauer Raster-Screens

Ives, Frederic

Frederic Eugene Ives (1856–1937), amerikanischer Fotograf und Erfinder, Pionier der Farbfotografie, Vater von Herbert E. Ives

Ives, Herbert

Herbert Eugene Ives (1882–1953), amerikanischer Physiker und Ingenieur, Direktor der elektro-optischen Forschung an den Bell Labs, Pionier der Autostereoskopie, bekannt für die Durchführung des Ives-Stilwell-Experiments zum Nachweis der Zeitdilatation

Jacobsen, Holger

Holger Jacobsen, lat. Olicherus Jacobaeus (1650–1701), dänischer Mediziner, Professor an der Universität von Kopenhagen, erstellte einen Katalog der königlichen Kuriositätensammlung

Janssen, Pierre

Pierre Jules César Janssen (1824–1907), französischer Astronom, Direktor des astrophysikalischen Instituts in Meudon, Entdecker des Heliums (zeitgleich mit Lockyer), entwickelte den „Janssen Revolver“ zur Planetenbeobachtung

Jaquet-Droz, Pierre

Pierre Jaquet-Droz (1721–1790), Schweizer Uhrmacher, Konstrukteur von Automaten

Jell, Peter

Peter A. Jell, Professor an der School of Earth and Environmental Sciences der University of Queensland, Australien

Johnston, Sean

Sean F. Johnston (geb. ca. 1955), britischer Physiker und Historiker, Professor für Science, Technology and Society an der University of Glasgow

Joly, John

John Joly (1857–1933), irischer Ingenieur und Geologe, Professor für Geologie am Trinity College in Dublin, Erfinder des Linienrasterverfahrens zur Farbfotografie, entwickelte eine Methode zur Bestimmung des Erdalters anhand des radioaktiven Zerfalls

Jordan, Max

Max Jordan (1837–1906), deutscher Kunsthistoriker, Dozent an der Universität Leipzig, Direktor der königlichen Nationalgalerie in Berlin

Julesz, Béla

Béla Julesz (1928–2003), ungarischer Elektroingenieur und Psychologe, Wissenschaftler bei den Bell Labs, Professor für Psychologie an der Rutgers University New Jersey, Schöpfer der Random-Dot-Stereogramme

Juncker, Christian

Christian Juncker (1668–1714), deutscher Lehrer und Schriftsteller

Kanolt, Clarence

Clarence Whitney Kanolt (1880–1964), amerikanischer Physiker und Erfinder, Leiter des kryogenischen Labors des National Bureau of Standards und US Bureau of Mines, Mitarbeiter bei Farrand Optical

Kant, Immanuel

Immanuel Kant (1724–1804), deutscher Philosoph, Professor für Logik und Metaphysik in Königsberg

Kaplan, Sam

Sam H. Kaplan (1915–2000), amerikanischer Chemiker und Erfinder, bekannt für seine Theorie der Parallax-Barriere und TV-Patente

Karl III.

Karl III. von Lothringen (1543–1608), Herzog von Lothringen

Kawamoto, Hirohisa

Hirohisa „Hiro“ Kawamoto (geb. 1938), japanischer Ingenieur, Forscher bei RCA, General Manager Sony Consumer Laboratory, Vice President Sharp

Keller-Dorian, Albert

Albert Keller-Dorian (1856–1924), französischer Ingenieur und Industrieller, Mitbegründer der Linsenraster-Farbfotografie (mit Berthon)

Kepler, Johannes

Johannes Kepler, auch Keppler, lat. Ioannes Keplerus, (1571–1630), deutscher Mathematiker und Astronom, beschrieb die heute nach ihm benannte „Keplerschen Gesetze“ zur Planetenbewegung

Kerr, John

John Kerr (1824–1907), schottischer Physiker, Mathematiklehrer am Free Church Training College in Glasgow, Entdecker des Kerr-Effektes

King, John

John King, jun. (1797–1871), John King & Son, Hersteller von mathematischen und optischen Instrumenten in der Clare-Street in Bristol

Kircher, Athanasius

Athanasius Kircher, lat. Athanasius Kircherus Fuldensis (1602–1680), deutscher Jesuit und Gelehrter, Professor für Mathematik in Würzburg und am Collegium Romanum in Rom, Hofmathematiker von Kaiser Ferdinand II. in Wien, Universalgelehrter, Forschungsreisender und Schriftsteller

Knebel, Karl Ludwig

Karl Ludwig von Knebel (1744–1834), deutscher Lyriker und Übersetzer, Lehrer und Hofmeister am Weimarschen Hof, Freund Goethes

Kodama, Hideo

Hideo Kodama (geb. 1950), japanischer Physiker und Patentanwalt, Forscher am Nagoya Municipal Industrial Research Institute, Visiting-Professor an der Nagoya University, Patentanwalt in der Kanzlei Kai-U

Koelbing, Huldrych

Huldrych Martin Koelbing (1923–2007), Schweizer Augenarzt und Medizinhistoriker, Professor für Geschichte der Medizin an der Universität Zürich

Kohlhans, Johann

Johann Christoph Kohlhans (1604–1677), deutscher Mathematiker, Professor für Mathematik am Gymnasium Casimirianum in Coburg

Krueger, Myron

Myron W. Krueger (geb. 1942), amerikanischer Computerkünstler, Erschaffer von interaktiven Videoinstallationen

Kubrick, Stanley

Stanley Kubrick (1928–1999), amerikanischer Fotograf, Regisseur und Drehbuchautor, bekannt u. a. für die Filme „Spartakus“ und „Full Metal Jacket“, Oscar für den Film „2001: Odyssee im Weltraum“

Kuhn, Franz

Franz Walther Kuhn (1884–1961) deutscher Jurist und Sinologe, Übersetzer des erotischen Romans Jin Ping Mei

Kuipers, Jack

Jack B. Kuipers (1921–2016), amerikanischer Ingenieur, Professor für Mathematik am Calvin College, Erfinder eines Positionssensors,

Kusch, Polykarp

Polykarp Kusch (1911–1993), deutsch-amerikanischer Physiker, Entwickler bei Westinghouse und Bell, Professor für Physik an der Columbia University und University of Texas, Forschung zum magnetischen Moment des Elektron, Nobelpreis für Physik 1955

Laertios, Diogenes

Diogenes Laertios, lat. Laertius (vermutl. 3. Jhd. n. Chr.), Philosophiehistoriker, Autor des 10bändigen Werkes „Über Leben und Lehren berühmter Philosophen“

Lagrange, Joseph-Louis

Joseph-Louis Lagrange, eigentl. Giuseppe Ludovico Lagrangia (1736–1813), italienischer Mathematiker und Physiker, Professor für Mathematik in Turin, Direktor der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin

Lambert, Johann

Johann Heinrich Lambert (1728–1777), deutscher Mathematiker und Philosoph, Begründer der Fotometrie

Land, Edwin

Edwin Herbert Land (1909–1991), amerikanischer Wissenschaftler und Unternehmer, erfand den Kunststoff-Polarisator, Gründer von Polaroid

Langer, Susanne

Susanne Katherina Langer (1895–1985) amerikanische Philosophin, Philosophiedozentin an verschiedenen amerikanischen Universitäten

Langhans, Carl

Carl Ferdinand Langhans (1781–1869), deutscher Architekt, Oberbaurat in Berlin, Erfinder des Pleoramas

Langmuir, Irving

Irving Langmuir (1881–1957), amerikanischer Chemiker und Physiker, Wissenschaftler bei General Electric, forschte u. a. zur Emission von Gasen und Theorie dünner Schichten, erfand den Namen „Plasma“, Nobelpreis für Chemie 1932

Lanier, Jaron

Jaron Lanier (geb. 1960), amerikanischer Computerkünstler, Entwickler des Datenhandschuhs, Pionier der virtuellen Realität

Larson, Ralf

Ralf Larson (geb. 1946), schwedischer Ingenieur und Unternehmer, Erfinder des Elektronenstrahlschmelzen, Gründer von Arcom

Laube, Hans

Hans E. Laube (1900–1976), Schweizer Techniker, Erfinder des Geruchkinos

Laue, Max

Max von Laue (1879–1960), deutscher Physiker, Professor für Physik in Frankfurt und Berlin, forschte u. a. zur Wellennatur der Röntgenstrahlung, Nobelpreis für Physik 1914

Lebon, Philippe

Philippe Lebon d'Humbersin (1767–1804), französischer Ingenieur, Professor für Mechanik an der École Nationale des Ponts et Chaussée, Erfinder der Gaslampe

Lechner, Bernard

Bernard J. Lechner (1934–2014), amerikanischer Ingenieur, Ingenieur bei RCA, erfand das „Active-Matrix-Display“

Ledermüller, Martin

Martin Frobenius Ledermüller (1719–1769), deutscher Jurist, Notar zu Nürnberg, Justizrat zu Bayreuth, Inspektor des Bayreuther Naturalienkabinetts, Mikroskopiker und Verfasser populärwissenschaftlicher Mikroskopiebücher

Lefort, Pierre

Pierre Henri Armand Lefort (1804–1880), französischer Fotograf, Erfinder des Polyorama panoptique

Lehmann, Otto

Otto Lehmann (1855–1922), Professor für Physik und Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe (heute Karlsruher Institut für Technologie)

Leibnitz, Gottfried Wilhelm

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716), deutscher Mathematiker und Philosoph, Universalgelehrter, bekannt u. a. für seine Beiträge zur Differential- und Integralrechnung und seinen umfangreichen Briefwechsel mit den Gelehrten seiner Zeit

Leith, Emmett

Emmett Norman Leith (1927–2005), amerikanischer Physiker, Professor für Elektrotechnik an der University of Michigan, gemeinsam mit Juris Upatnieks Entwickler der praktischen Holografie

Lem, Stanisław

Stanisław Herman Lem (1921–2006), polnischer Schriftsteller und Philosoph, erfolgreicher Science-Fiction-Autor, einige seiner Werke wurden verfilmt

Leroi-Gourhan, André

André Leroi-Gourhan (1911–1986) französischer Archäologe und Paläontologe, Professor an der Sorbonne und am Collège de France, ordnete Kunststile der Höhlenmalerei nach Technik und Alter

Leukipp

Leukipp, auch Leukippos oder Leukippus (5. Jhd. v. Chr.), griechischer Philosoph, Schüler des Parmenides, Lehrer des Demokrit, mit Demokrit Begründer des Atomismus

Levoy, Marc

Marc Levoy (geb. 1953), amerikanischer Architekt und Computerwissenschaftler, Professor für Computerwissenschaften in Stanford

Lieberkühn, Johann

Johann Nathanael Lieberkühn (1711–1756); deutscher Mediziner und Mikroskopiker, Mitglied der Royal Society und Leopoldina, verbesserte und fertigte eigene Mikroskope

Lincoln, William

William Ensign Lincoln (1847–1944), amerikanischer Schriftsteller, Sohn und Biograf des Latein- und Literaturprofessors John Larkin Lincoln

Link, Ed

Edwin Albert Link (1904–1981), amerikanischer Erfinder, Pilot und Unternehmer, Erfinder des Flugsimulators „Link Trainers“, Gründer von Link Aviation Devices (heute L3 Commercial Training)

Linné, Carl

Carl von Linné, auch Linnaeus (1707–1778), schwedischer Naturforscher, Professor an der Universität Uppsala, Verfasser einer Enzyklopädie zur Systematik und Terminologie der Natur

Lippmann, Gabriel

Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann (1845–1921), französischer Physiker, Professor für Physik an der Sorbonne in Paris, Nobelpreis für Physik 1908, Erfinder der Integralfotografie

Lipton, Lenny

Lenny Lipton (geb. 1940), amerikanischer Stereograf, Autor und Unternehmer, Gründer von StereoGraphics (heute RealD)

Listing, Johann

Johann Benedict Listing (1808–1882), deutscher Mathematiker und Physiker, Professor für Physik und Mathematik in Göttingen, führte den Begriff Topologie in die Mathematik ein

Lobatschewski, Nikolai

Nikolai Iwanowitsch Lobatschewski (1792–1856), russischer Mathematiker, Professor an der Universität Kasan, forschte zur nichteuklidischen Geometrie

Lorenzetti

Ambrogio Lorenzetti (1290–1348) und Pietro Lorenzetti (1280–1348), italienische Maler

Lossew, Oleg

Oleg Wladimirowitsch Lossew (1903–1942), russischer Funktechniker, forschte am Nischni Nowgoroder Lenin-Radiolaboratorium auf dem Gebiet der Halbleitertechnik und Elektrolumineszenz

Lubschez, Ben

Ben Jehudah Lubschez (1881–1963), ukrainisch-amerikanischer Architekt und Fotograf, Autor von Büchern über Themen der Darstellung

Luckey, Palmer

Palmer Freeman Luckey (geb. 1992), amerikanischer Unternehmer, Gründer von Oculus

Ludwig XIV.

Ludwig XIV. (1638–1715), französischer Adliger, Sohn Ludwig des XIII. und Anna von Österreich, bereits im Alter von 4 Jahren formal der König von Frankreich, mit 22 Jahren tatsächlich

Lukian

Lukian von Samosata (120–180), griechischer Schriftsteller, Satiriker, bis in die Neuzeit einflussreicher Schriftsteller

Peter A. Jell

Titus Lucretius Carus (94 v. Chr. – 53 v. Chr.), römischer Philosoph, Schüler des Philodemus, gilt als einer der wichtigsten Textquellen zu Epikur, Atomist und Materialist, „bewies“ die Sterblichkeit der Seele

Lumière, Auguste

Auguste Marie Louis Nicolas Lumière, (1862–1954), französischer Foto-Unternehmer, Gründer der Laboratoires Lumière, gemeinsam mit seinem Bruder Louis Erfinder des Kinematographen

Lumière, Louis

Louis Jean Lumière (1864–1948), französischer Foto-Unternehmer, gemeinsam mit seinem Bruder Auguste Erfinder des Kinematographen

MacCrellish, Frederick

Frederick MacCrellish (1828–1882), amerikanischer Redakteur und Zeitungsverleger, Teilhaber an der Tageszeitung „Alta California“, San Francisco

Mach, Ernst

Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach (1838–1916), österreichischer Physiker, Physiologe und Philosoph, Professor in Graz, Prag und Wien

Magnus, Albertus

Albertus Magnus, auch Albert der Große, Albert der Deutsche oder Albert von Lauingen, lat. Albertus Theutonicus oder Albertus Coloniensis (um 1200–1280), deutscher Kirchengelehrter, Dominikaner, Bischof von Regensburg

Magnus, Eduard

Leopold Eduard Samuel Magnus (1799–1872), deutscher Maler, Professor der Berliner Kunstabakademie

Magnus, Hugo

Hugo Magnus (1842–1907), deutscher Ophthalmologe und Medizinhistoriker, Professor in Breslau

Maiman, Theodore

Theodore Harold Maiman (1927–2007), amerikanischer Physiker, Forscher bei Hughes Research, Gründer der Korad Corporation, Erfinder des Lasers

Malus, Louis

Étienne Louis Malus (1775–1812), französischer Offizier und Ingenieur, das Gesetz von Malus ist nach ihm benannt

Manetti, Antonio

Antonio Manetti (1423–1497), italienischer Architekt, Biograf Brunelleschis

Mann, Steve

Steve Mann (geb. 1962), kanadischer Informatiker, Professor an der Universität von Toronto, Spezialist im Bereich Wearable Computing

Marcks, Gerhard

Gerhard Marcks (1889–1981), deutscher Bildhauer, Professor an der Kunsthochschule Burg Giebichenstein, leitete die Bauhaus-Töpferei in Dornburg, sein Bruder Dietrich Marcks war Mitglied der Grabungskampagne von Borchardt

Marconi, Guglielmo

Guglielmo Marchese von Marconi (1874–1937), italienischer Radiotechniker, Gründer der Wireless Telegraph and Signal Co.; Nobelpreis für Physik 1909 (gemeinsam mit Braun)

Marey, Jules

Étienne-Jules Marey (1830–1904), französischer Physiologe und Ingenieur, Professor für Naturgeschichte am Collège de France, Präsident der Académie des Sciences, Erfinder medizinischer und fotografischer Gerätschaften, Gründer des Institut des Sciences du Mouvement (heute nach ihm benannt)

Marg, Elwin

Elwin Marg (1918–2010), amerikanischer Ophthalmologe, Professor für physiologische Optik und Optometrie an der Universität Berkeley, Gründer der Minerva Foundation (gemeinsam mit seiner Frau)

Martini, Martino

Martino Martini (1614–1661), italienischer Jesuit und Historiker, wirkte als Missionar und Gelehrter in China, ist vor allem durch seine historischen und geografischen Werke über China bekannt

Marx, Karl

Karl Marx (1818–1883), deutscher Philosoph, Theoretiker des Sozialismus und Kommunismus, Mitbegründer des Bundes der Gerechten (Bund der Kommunisten), Verfassers des „Manifest der kommunistischen Partei“ und „Das Kapital“, Mitglied der Royal Society of Arts

Masaccio

Tommaso di Ser Giovanni di Mone Cassai, genannt Masaccio (1401–1428), italienischer Maler, gehört zu den Begründern der realistischen Malerei in der Frührenaissance

Mau, August

August Mau (1840–1909), deutscher Archäologe, Erforscher von Pompejis Wandmalereien, die er in Stilepochen einteilte

Maxwell, Delle

Delle Rae Maxwell (geb. 1953), amerikanische Computerwissenschaftlerin, Tochter des Geophysikers Arthur E. Maxwell, verheiratet mit Pat Hanrahan, Mitbegründerin der Maxwell-Hanrahan-Foundation

Maxwell, James

James Clerk Maxwell (1831–1879), schottischer Physiker, Professor für Physik am Kings College in London und in Cambridge, bekannt für die Maxwell'schen Gleichungen

May, Brian

Brian Harold May (geb. 1947), Musiker und Physiker, Gitarrist (Queen), Direktor der London Stereoscopic Company

Mehmke, Rudolf

Rudolf Mehmke (1857–1944), deutscher Mathematiker, Professor an den Technischen Hochschulen Darmstadt und Stuttgart

Meisenbach, Georg

Georg Meisenbach (1841–1912), deutscher Kupferstecher und Unternehmer, Erfinder einer Maschine zur Herstellung von Linienrastern

Melzi, Francesco

Francesco Melzi (1491–1570), italienischer Maler, Schüler und Erbe von Leonardo da Vinci

Meyerhof, Max

Max Meyerhof (1874–1945), deutscher Mediziner und Augenarzt in Kairo

Minkowski, Hermann

Hermann Minkowski (1864–1909), deutscher Mathematiker und Physiker, Professor in Göttingen, Freund Hilberts, entwickelte die vierdimensionale Raumzeit (Minkowski-Raum)

Molyneux, William

William Molyneux (1656–1698), irischer Naturphilosoph und Jurist, Übersetzer von Descartes und Leibnitz, Mitglied der Royal Society

Monteath, Frederick

Frederick Hutchinson Monteath (1866–1938), australischer Fotograf, mit Monteath Photo Sculpture, Sydney, Hersteller fotografischer Reliefs

Moon, Parry

Parry Hiram Moon (1898–1988), amerikanischer Ingenieur, wissenschaftlicher Autor, Professor am Massachusetts Institute of Technology

Moreau, Jacques-Joseph

Jacques-Joseph Moreau (1804–1884) französischer Psychiater, erforschte die Wirkung von Rauschmitteln am Menschen

Morgan, William

William Morgan, (geb. verm. vor 1820 – unbek.) britischer Verleger und Lithograf, Herausgeber der „Dioramic Views“

Morioka, Isao

Isao Morioka (1894–1985), japanischer Künstler und Skulptograf, Gründer der Rittais-hashinzo-Studios

Moser, Ludwig

Ludwig Moser (1805–1880), deutscher Physiker, Professor für Physik in Königsberg

Mosher, Ralph

Ralph S. Mosher (1920–2008), amerikanischer Ingenieur, Entwickler von Lauf-maschinen und Exoskeletten by General Electrics, Gründer von Robotics Inc

Müller, Johannes

Johannes Peter Müller (1801–1858), deutscher Mediziner und Physiologe, Professor für Physiologie in Bonn und Berlin, Verfasser des Handbuchs der Physiologie des Menschen

Munz, Otto

Otto John Munz, auch Münz (1907–1980), amerikanischer Anwalt und Erfinder

Muth, Heinrich

Heinrich Ludwig Muth (1673–1754), deutscher Optiker, Optikus und Hofmathematikus in Kassel

Muybridge, Eadweard

Eadweard Muybridge, eigentl. Edward James Muggeridge (1830–1904), britischer Fotograf und Erfinder, seine Bewegungsstudien führten zum Bewegtbild

Nakamura, Shuji

Shuji Nakamura (geb. 1954), japanisch-amerikanischer Elektronikingenieur, Entwicklungsleiter bei Nichia, Professor an der University of California und an der Universität Bremen, Nobelpreis für Physik 2014 (gemeinsam mit Akasaki und Amano)

Negroponte, Nicholas

Nicholas Negroponte (geb. 1943), amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor am Massachusetts Institute of Technology, Honorarprofessor an der Universität der Künste Berlin, Mitbegründer des MIT Media Lab

Neumann, John

John von Neumann, auch Johann von Neumann, eigentl. János Lajos Neumann von Margitta (1903–1957), ungarisch-amerikanischer Mathematiker, Pionier der Computer-technik

Newton, Isaac

Sir Isaac Newton (1643–1727), englischer Physiker und Mathematiker, Inhaber des Lucasischen Lehrstuhls für Mathematik am Trinity College in Cambridge

Ng, Ren

Ren Ng (geb. 1979), amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor für Computerwissenschaften in Stanford, Gründer von Lytro

Nicolai, Ernst

Ernst Anton Nicolai (1722–1802), deutscher Mediziner, Professor für Medizin in Halle und Jena, verfasste bereits medizinische Schriften in deutscher Sprache

Niépce, Nicéphore

Joseph „Nicéphore“ Niépce (1765–1833) französischer Erfinder, Pionier der Fotografie, Erfinder der Heliografie

Nietzsche, Friedrich

Friedrich Wilhelm Nietzsche (1844–1900), deutscher Philologe und Philosoph, Professor für klassische Philologie in Basel, bekannt ist vor allem sein Werk „Also sprach Zarathustra“

Nipkow, Paul

Paul Julius Gottlieb Nipkow (1860–1940), deutscher Erfinder, erfand die Nipkow-Scheibe

Noaillon, Edmond

Edmond Henri Victor Noaillon (unbek., vermutl. geb. vor 1910), belgischer Ingenieur und Erfinder

Nofretete

Nofretete oder Nefertiti (ca. 1370 – 1330 v. Chr.), Gemahlin des Echnaton und Schwiegermutter von Tutanchamun

Norling, John

John A. Norling (1895–1957), amerikanischer Filmingenieur und Unternehmer, Mitbegründer der Loucks-Norling Studios

North, Alex

Alex North (1910–1991), amerikanischer Komponist, schuf zahlreiche Filmmusiken

Obama, Barack

Barack Hussein Obama (geb. 1961), amerikanischer Politiker, 44. Präsident der USA (2009–2017)

Oseen, Carl

Carl Wilhelm Oseen (1879–1944), schwedischer Physiker, Professor für mathematische Physik an der Universität Uppsala, Direktor des Nobel-Institutes

Ovid

Publius Ovidius Naso (43 v. Chr. – 17 n. Chr.), römischer Dichter, bis in die Neuzeit viel gelesener Schriftsteller, bekannt besonders für die „Metamorphosen“

Pacioli, Luca

Luca Pacioli, lat. Lucas de Burgo S. Sepulchri (1445–1514), italienischer Franziskaner und Mathematiker, Lehrer da Vincis

Pamphilos

Pamphilos, lat. Pamphilus (390 v. Chr. – 350 v. Chr.), griechischer Maler, Lehrer des Apelles

Panofsky, Erwin

Erwin Panofsky (1892–1968), deutscher Kunsthistoriker, Professor in Hamburg und Princeton, beschäftigte sich u. a. auch mit der Perspektive in der antiken Wandmalerei und den Bildern der Renaissance

Panum, Peter

Peter Ludvig Panum (1820–1885), dänischer Physiologe, Professor für Physiologie in Kiel und Kopenhagen

Paris, John

John Ayrton Paris (1785–1856), britischer Arzt, Präsident des Royal College of Physicians, Mitglied der Royal Society, wird als Erfinder des Thaumatrops angesehen

Parrhasios

Parrhasios von Ephesos (ca 440 v. Chr. – 385 v.Chr), griechischer Maler, wurde von Zeitzeugen für die Feinheit und den Realismus seiner Malerei gerühmt

Paullini, Christian

Christian Franz Paullini (1643–1712), thüringischer Arzt und Schriftsteller, Leibarzt Bischofs von Münster und Stadtarzt von Eisenach, Verfasser kurioser Schriften

Peckham, Johannes

Johannes Peckham, lat. auch Ioannes de Pecham (um 1220–1292), englischer Geistlicher, Verfasser von Schriften über Mathematik und Optik, Rektor der Pariser Universität, späterer Erzbischof von Canterbury

Pepper, John

John Henry Pepper (1821–1900), britischer Lehrer und wissenschaftlicher Präsentator, Professor für Chemie und Direktor an der Royal Polytechnic Institution in London

Perikles

Perikles (490 v. Chr. – 429 v. Chr.), griechischer Politiker, Schüler des Anaxagoras, Strateg (Feldherr) der attischen Demokratie

Petit, Pierre

Pierre Petit (1594–1677), französischer Mathematiker, Astronom und Instrumentenbauer, einflussreicher Ingenieur (Generalintendant der Befestigungen) am Hofe Ludwig XIV., mit Pascal am Vacuum-Experiment beteiligt, heute bekannt vor allem als Briefpartner von Huygens

Pettitt, Paul

Paul Barry Pettitt, britischer Archäologe, Professor für Archäologie an der Durham University, Großbritannien, spezialisiert auf paläolithische Kunst

Phylidor

Phylidor, auch Philidor, Philidore, Phillidore oder Paul de Philipsthal in verschiedenen Abwandlungen(vermutl. 2. Hälfte 18. Jhd. – 1829), holländisch-französischer (brabantischer) Magier, bekannt für seine Bühnenauftritte mit Geistererscheinungen

Pisanello

Antonio Pisanello, auch Antonio di Puccio Pisano (1395–1455), italienischer Maler und Zeichner, bekannt für seine realistischen Tier- und Pflanzenzeichnungen

Pittman, Gary

Gary E. Pittman, (geb. um 1930), amerikanischer Ingenieur, Ingenieur bei Texas Instruments, Statistiker

Planck, Max

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947), deutscher Physiker, Professor für Physik in Kiel und Berlin Göttingen, Nobelpreis für Physik 1918 für die Entdeckung des Energiequantums

Plateau, Joseph

Joseph Antoine Ferdinand Plateau (1801–1883), belgischer Physiker, Professor in Gent, forschte auf dem Gebiet der Nachbildungswirkung, Erfinder des Phenakistiskops, nach ihm ist das mathematische Plateau-Problem benannt

Platon

Platon, lat. Plato (427 v. Chr. – 348 v. Chr.), griechischer Philosoph, Schüler des Sokrates

Platter, Felix

Felix Platter (1536–1614), Schweizer Arzt und Anatom, Professor für praktische Medizin und Rektor an der Universität Basel, führte öffentliche Sektionen durch, verfasste einflussreiche Werke über die menschliche Anatomie, klinische Medizin und psychische Krankheiten

Plinius

Plinius der Ältere, Gaius Plinius Secundus (23 n. Chr. – 79 n. Chr.), römischer Gelehrter und Schriftsteller

Plutarch

Plutarch, auch Plutarchos, lat. Plutarchus (45–125), griechischer Schriftsteller, verfasste zahlreiche Biografien, aber auch philosophische Schriften

Polhemus, Bill

William L. „Bill“ Polhemus (1924–1998), amerikanischer Offizier und Ingenieur, Gründer von Polhemus Navigation, Präsident des Instituts für Navigation (ION), Virginia

Polyhistor, Alexander

Alexander Polyhistor, auch Lucius Cornelius Alexander Polyhistor (ca. 100 v. Chr. – 40 v. Chr.), griech. Gelehrter

Pope, Martin

Martin Pope (geb. 1918), amerikanischer Chemiker, Professor für Chemie an der New York University, forschte an den Grundlagen der organischen Leuchtdioden

Pöppel, Ernst

Ernst Pöppel (geb. 1940), deutscher Psychologe, Professor für Psychologie in München

Portlock, Joseph

Joseph Ellison Portlock (1794–1864) britischer Geologe und Soldat, Mitglied der Royal Society und General der Royal Engineers

Pötschke, H.

Hermann? Pötschke (wirkte zw. 1890 u. 1917), deutscher Maurermeister und Photoskulpteur

Ptolemaios I.

Ptolemaios I. Soter, lat. Ptolemaeus (366 v. Chr. – 283 v. Chr.), General Alexander des Großen und späterer Regent in Alexandria

Ptolemäus, Claudius

Claudius Ptolemäus (ca. 100–160), griechischer Astronom und Philosoph, entwickelte das geozentrische Weltbild (mit der Erde im Mittelpunkt), verfasste Werke zur Optik und Erkenntnistheorie

Pulfrich, Carl

Carl Pulfrich (1858–1927), deutscher Physiker und Optiker, Mitarbeiter bei Carl Zeiss, arbeitete insbesondere auf dem Gebiet der Stereoskopie

Purkinje, Jan

Jan Evangelista Purkyně od. Johannes Evangelista Ritter von Purkinje (1787–1869), tschechischer Physiologe, Professor für Physiologie in Prag, forschte auf dem Gebiet der Sinneswahrnehmung, nach ihm ist der Purkinje-Effekt benannt

Pythagoras

Pythagoras von Samos (570 v. Chr. – 510 v. Chr.), griechischer Philosoph und Mathematiker, Gründer der Pythagoreischen philosophischen Schule, ihm wird der Satz des Pythagoras zugeschrieben

Qin

Qin Shihuangdi, eigentl. Ying Zheng (259 v. Chr. – 210 v. Chr.), König von Qin, 1. Kaiser von China, Begründer der Qin-Dynastie, bekannt für seine Gewaltherrschaft und Großvorhaben (besonders die chinesische Mauer und sein Mausoleum)

Quantz, Johann

Johann Joachim Quantz (1697–1773), deutscher Flötist, Stadtpfeifer von Pirna, Flötist an der Kurfürstlich-Sächsischen Kapelle in Dresden, Hofkomponist Friedrich des Großen

Quinquet, Antoine

Antoine-Arnoult Quinquet (1745–1803), französischer Apotheker, arbeitete mit Argand am Ballon für Montgolfier, verbesserte die Argand-Lampe

Radon, Johann

Johann Karl August Radon (1887–1956), österreichischer Mathematiker, Professor für Mathematik in Hamburg, Greifswald, Breslau, Erlangen und Wien, Präsident der Österreichischen Mathematischen Gesellschaft, bekannt besonders für die Radon-Transformation

Raffael

Raffael da Urbino, auch Raffaello Sanzio da Urbino (1483–1520), italienischer Maler und Architekt, u. a. Maler für die Wandgemälde des Apostolischen Palastes, Bauleiter für den Petersdom in Rom

Ramses II.

Ramses II. (1303 v. Chr. – 1213 v. Chr.), Pharao der 19. Dynastie, Sohn des Sethos I.

Ramses III.

Ramses III. (1221 v. Chr. – 1156 v. Chr.), Pharao der 20. Dynastie, Sohn des Sethnacht

Ranke, Hermann

Hermann Ranke (1878–1953), deutscher Ägyptologe, Professor für Ägyptologie an der Universität Heidelberg, Leiter des dortigen Ägyptologischen Instituts, nahm an einigen Grabungen in Ägypten teil, war mit Borchardt an der Entdeckung der Büste der Nofretete beteiligt

Rankine, William

William John Macquorn Rankine (1820–1872), schottischer Physiker und Bauingenieur, Professor für Bauingenieurwesen in Glasgow, einflußreicher Thermodynamiker, Gründer der Institution of Civil Engineers

Reinitzer, Friedrich

Friedrich Richard Cornelius Reinitzer (1857–1927), Professor für Botanik an der Deutschen Technischen Hochschule in Prag

Reisch, Emil

Emil Reisch (1863–1933), österreichischer Archäologe, Professor für Archäologie an der Universität Wien, Direktor des Österreichischen Archäologischen Instituts

Rembrandt

Rembrandt van Rijn (1606–1669), niederländischer Maler

Reynaud, Émile

Charles-Émile Reynaud (1844–1918), französischer Mechaniker und Fotograf, Erfinder des Praxinoskops und des Théâtre Optique (Filmprojektion)

Riemann, Bernhard

Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826–1866), deutscher Mathematiker, Professor für Mathematik in Göttingen, lieferte Grundlagen zur Theorie des höherdimensionalen Raumes

Risner, Friedrich

Friedrich Risner (1533–1580), deutscher Mathematiker und Übersetzer, bekannt besonders für seine lat. Übersetzung und Herausgabe von Alhazens und Witelos Optik

Rittenhouse, David

David Rittenhouse (1732–1796), amerikanischer Astronom und Mathematiker, Professor für Astronomie an der State University of Pennsylvania, Präsident der American Philosophical Society.

Roberts, Lawrence

Lawrence Gilman „Larry“ Roberts (1937–2018), amerikanischer Ingenieur, Mitentwickler des ARPANET

Robertson, Stephan

Stephan Kaspar Robertson od. d'Étienne-Gaspard Robertson, eigentl. Étienne-Gaspard Robert, Künstlername (1763–1837), belgischer Magier und Ballonfahrer

Robin, Henri

Henri Robin, eigentl. Henri Joseph Donckèle (1811–1874), französischer Magier

Roddenberry, Gene

Eugene Wesley Roddenberry (1921–1991), amerikanischer Fernseh- und Filmproduzent, Drehbuchautor, Autor und Produzent der Serie „Star Trek“

Roget, Peter

Peter Mark Roget (1779–1869), britischer Arzt und Physiologe, Professor für Physiologie an der Royal Institution, Verfasser des „Roget's Thesaurus“

Rohr, Moritz

Moritz von Rohr (1868–1940) deutscher Optiker, Assistent von Abbe bei Carl Zeiss, Professor für Optik an der Universität Jena, Entwickler verschiedener Optischer Geräte

Rollmann, Wilhelm

Wilhelm Rollmann (1821–1890), deutscher Lehrer, Lehrer für Physik und Mathematik am Gymnasium Stargard, gilt gemeinsam mit d'Almeida als Entdecker des Anaglyphenverfahrens

Röntgen, Wilhelm

Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923), deutscher Physiker, Professor für Physik in Straßburg, Hohenheim, Gießen, Würzburg und München, Entdecker der „Röntgenstrahlen“, Nobelpreis für Physik 1901

Rosenbach, Ottomar

Ottomar Ernst Felix Rosenbach (1851–1907), deutscher Arzt, Psychotherapeut, Chefarzt des Breslauer Allerheiligen-Hospitals, Professor an der Universität Breslau

Ross, Douglas

Douglas Taylor Ross (1929–2007), amerikanischer Computerwissenschaftler, Mitentwickler der Computersprache APT, Gründer von SofTech

Rothafel, Roxy

Samuel Lionel „Roxy“ Rothafel, eigentl. Rothapfel (1882–1936), amerikanischer Kino-manager, Gründer des Roxy Theaters

Round, Henry

Henry Joseph Round (1881–1966), englischer Ingenieur, Chief Engineer bei Marconi, Entdecker des Round-Effekts

Rubens

Peter Paul Rubens (1577–1640), flämischer Maler

Salisbury, Johannes

Johannes von Salisbury, lat. Joannes Salisberiensis (um 1115–1180), englischer Theologe, Bischof von Chartres

Sandin, Daniel

Daniel J. Sandin (geb. 1942), amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor an der University of Illinois at Chicago, gemeinsam mit DeFanti Gründer des Electronic Visualization Laboratory

Sandart, Joachim

Joachim von Sandrart (1606–1688), deutscher Maler und Kunsthistoriker, verfasste bedeutsame Schriften zur Kunstgeschichte

Sankai, Yoshiyuki

Yoshiyuki Sanka (geb. 1958), japanischer Ingenieur und Unternehmer, Professor an der Universität von Tsukuba, Entwickler des HAL Roboteranzugs, Gründer des Unternehmens Cyberdyne

Schadt, Martin

Martin Schadt (geb. 1938), Schweizer Physiker, Entwickler von Flüssigkristallanzeigen, Gründer der Firma Rolic

Scheiner, Christoph

Christoph Scheiner (1573–1650), deutscher Jesuit, Physiker, Optiker und Astronom, Professor für Physik und Astronomie in Ingolstadt, späterer Rektor der Klosterschule St. Anna (heute das Lyzeum „Carolinum“) im schlesischen Neisse (heute poln. Nysa)

Scherer, Alexander

Alexander Nicolaus Scherer (1772–1824), deutsch-russischer Chemiker, Professor für Chemie in Dorpat (Estland) und Sankt Petersburg

Schopenhauer, Arthur

Arthur Schopenhauer (1788–1860), deutscher Philosoph, Autor einflussreicher Werke

Schott, Caspar

Caspar Schott, auch Kaspar Schott (1608–1660), deutscher Jesuit, Professor für Mathematik und Physik in Würzburg, Schüler von Athanasius Kircher

Schumpeter, Joseph

Joseph Alois Schumpeter (1883–1950), österreichischer Ökonom und Politiker, Professor in Harvard

Schwenter, Daniel

Daniel Schwenter, (1585–1636), deutscher Mathematiker, Professor an der Nürnbergerischen Universität in Altdorf „Altdorfina“ (aufgelöst 1809)

Scott, Leader

Leader Scott, Pseudonym für Lucy Baxter (1837–1902), englische Schriftstellerin, Tochter des Poeten William Barnes, verfasste einige Schriften über italienische Kunst und Architektur

Sedgwick, Adam

Adam Sedgwick (1785–1873), englischer Geologe und Geistlicher, Professor für Geologie in Cambridge, Kritiker von Darwins Evolutionstheorie

Seeber, Ludwig

Ludwig August Seeber (1793–1855), Professor für Physik in Freiburg und Karlsruhe

Séguin, Pierre

Pierre Séguin (unbek. – 1884), französischer Glasmaler, Erfinder des Polyoramas und Polyoskops

Selke, Willy

Willy Alfred Carl Selke (wirkte ca. 1895–1915, Lebensdaten unbek.), deutscher Fotograf und Erfinder, Photoskulpteur

Sethos I.

Sethos I. (1323 v. Chr. – 1279 v. Chr.), Pharao der 19. Dynastie, Vater von Ramses II.

Shakespeare, William

William Shakespeare (1564–1616), englischer Schriftsteller und Schauspieler

Shaw, Wilfrid

Wilfrid „Bud“ Shaw, (geb. 1930), amerikanischer Chemiker, forschte mit Brown zur Nutzung von Flüssigkeitskristallen

Smith, Robert

Robert Smith (1689–1768), britischer Mathematiker, Professor für Astronomie in Cambridge

Smith, Willoughby

Willoughby Smith (1828–1891), englischer Ingenieur, entdeckte die Lichtempfindlichkeit von Selen

Snow, Dean

Dean R. Snow (geb. 1940), amerikanischer Anthropologe, Professor für Anthropologie, Pennsylvania State University, USA, von 2007–2009 Präsident der Society for American Archaeology

Sokrates

Sokrates (469 v. Chr. – 399 v. Chr.), griechischer Philosoph, Schüler des Archelaos (der ein Schüler des Anaxagoras war), Lehrer des Platon und Xenophon, Praktiker des philosophischen Disputes, als alter Mann zum Tode verurteilt und hingerichtet

Solon

Solon (640 v. Chr. – 560 v. Chr.), griechischer Politiker und Philosoph, die solonische Ordnung gilt als Anfang der Demokratie

Sombrowsky, Reiner

Reiner Sombrowsky (geb. 1950), deutscher Mathematiker, Entwickler des Holotron-Monitor

Sophokles

Sophokles (497 v. Chr. – 406 v. Chr.), griechischer Dichter, seine Tragödien (vor allem „Antigone“ und „König Ödipus“) wurden auch in Deutsche übersetzt und werden bis heute aufgeführt

Spencer, Domina

Domina Eberle Spencer (geb. 1920), amerikanische Mathematikerin, Professorin für Mathematik an der Universität Connecticut, Ehefrau von Parry Moon

Spooner, William

William Matthias Spooner (1796–1882). britischer Verleger, Erfinder der „Protean Views“

Sprigg, Reginald

Reginald Claude Sprigg (1919–1994), australischer Geologe und Unternehmer, Entdecker der Ediacara-Fauna (Makrofossilien)

Stampfer, Simon

Simon Ritter von Stampfer (1790–1864), österreichischer Mathematiker, Professor am Polytechnischen Institut in Wien (heute TU Wien)

Stanford, Leland

Amasa Leland Stanford (1824–1893), amerikanischer Unternehmer und Politiker, Mitbegründer und Präsident der Central Pacific Railroad, Gouverneur von Kalifornien, Begründer der Stanford University

Steenblik, Richard

Richard A. Steenblik (geb. 1957), amerikanischer Ingenieur, Erfinder des Chroma-Depth-Verfahrens

Steiner, Johann

Johann Ludwig Steiner (1711–1779), Schweizer Optiker und Uhrmacher, Mitbegründer der Zürcher Naturforschenden Gesellschaft, Übersetzer optischer Schriften

Stierlin, Henri

Henri Stierlin (geb. 1928), Schweizer Kunsthistoriker; Herausgeber illustrierter Kunstbücher, vertrat die These der Fälschung der Büste der Nofretete durch Borchardt

Stumpf, Felix

Felix Stumpf (1885–1970), deutscher Physiker, Privatdozent an der Technischen Hochschule Berlin, Sohn des Psychologen und Musikforschers Carl Stumpf, nach dessen Tod auch Herausgeber der „Erkenntnislehre“

Sturm, Johannes

Johannes Christoph Sturm (1635–1703), deutscher Mathematiker und Physiker, Professor für Mathematik und Physik an der Universität Altdorf

Sutherland, Ivan

Ivan Edward Sutherland (geb. 1938), amerikanischer Computerwissenschaftler, Professor in Harvard, University of Utah und am California Institute of Technology, Entwickler grafischer Ein- und Ausgabesysteme

Swainson, Wyn

Wyn Kelly Swainson (geb. 1939), dänisch-amerikanischer Chemiker und Ingenieur, Entwickler früher 3D-Druck-Anwendungen, Gründer von Formigraphic (später Omtec Replication)

Swedenborg, Emanuel

Emanuel Swedenborg, eigentl. Swedberg (1688–1772), schwedischer Gelehrter und Mystiker, Begründer der Neuen Kirche (Swedenborgianer)

Symons, Walter

Walter Symons (vermutl. 1855–1905), britischer Verlagsmanager, Erfinder der Moto-graph-Bilder

't Hooft, Gerard

Gerard od. Gerardus 't Hooft (geb. 1946), niederländischer Physiker, Professor an der Universität Utrecht, Nobelpreis für Physik 1999 gemeinsam mit Martinus Veltman

Tacquet, André

André Tacquet, auch Andrea Tachenius (1612–1660), belgischer Jesuit und Mathematiker. Lehrer am Jesuiten-Kolleg in Löwen, Verfasser von mathematischen Lehrbüchern

Talbot, Henry

William Henry Fox Talbot (1800–1877), englischer Naturwissenschaftler, Pionier der Fotografie, bekannt für die Entdeckung des Selbstabbildungseffekts (heute „Talbot Effekt“),

Tang, Ching

Ching Wan Tan (geb. 1947), chinesisch-amerikanischer Chemiker, Forscher bei Eastman Kodak, Professor für Chemie an der University of Rochester, gilt als Erfinder der OLED (gemeinsam mit van Slyke)

Thales

Thales von Milet (um 623 v. Chr. – 548 v. Chr.), griechischer Philosoph, einer der Sieben Weisen

Theodotos

Theodotos von Ätolien, auch Theodotas (3. Jhd. v. Chr.), Feldherr des Ptolemaios IV., bekannt für seinen Verrat an Ptolemaios

Theophrast

Theophrast, auch Theophrastos von Eresos (371 v. Chr. – 287 v. Chr.), griechischer Philosoph und Botaniker, Schüler des Aristoteles

Thomson, William

William Thomson, Lord Kelvin (1824–1907), britischer Physiker, Professor für Naturphilosophie in Glasgow, forschte auf den Gebieten der Elektrizität und Thermodynamik, die Einheit Kelvin ist nach ihm benannt

Thutmosis

Thusmosis, auch Thustumose (14. Jhd. v. Chr.), ägyptischer Bildhauer zur Zeit des Pharaos Echnaton, bekannt durch die Entdeckung seines Ateliers durch Borchardt

Timoshenko, Gregory

Gregory Stephen Timoshenko (1904–2000), ukrainisch-amerikanischer Physiker, Professor für Elektrotechnik an der Universität von Connecticut, Sohn des Mechanik-Pioniers Stephen Timoshenko

Tiraboschi, Girolamo

Girolamo Tiraboschi (1731–1794), italienischer Jesuit und Historiker, Leiter der Bibliothek am Hof von Modena

Tóth, László

László Fejes Tóth (1915–2005), ungarischer Mathematiker, Professor am Alfred Renyi Institut in Budapest

Trentsensky, Mathias

Mathias Trentsensky (1790–1868), österreichischer Lithograph und Verleger, fertigte Bilderbögen, produzierte und verlegte die Bildreihen für Stampfers stroboskopische Scheiben in der Kunsthändlung Trentsensky und Vieweg

Tutanchamun

Tutanchamun (1342 v. Chr. – 1323 v. Chr.), Pharao der 18. Dynastie, besonders bekannt durch die Entdeckung seines reich ausgestatteten Grabs im Tal der Könige im 20. Jhd.

Tyler, Christopher

Christopher W. Tyler (geb. 1943), englischer Neurowissenschaftler, Professor an der City University of London

Uchatius, Franz

Franz Freiherr von Uchatius (1811–1881), österreichischer Offizier, zuletzt im Rang eines Feldmarschallleutnants, erfand die Stahlbronze und einen Bewegtbildprojektor

Unterseher, Fred

Fred Unterseher (geb. 1946), amerikanischer Künstler, Erfinder der holografischen kinetischen Figuren, Mitbegründer der Multiplex Company, Mitbegründer „School of Holography“ (beides mit Lloyd Cross)

Upatnieks, Juri

Juris Upatnieks (geb. 1936), lettisch-amerikanischer Physiker und Erfinder, Professor für Elektrotechnik an der University of Michigan, mit Emmett Leith Entwickler der praktischen Holografie

Valius, Nikolai

Nikolai Adamovich Valius (unbek., vermutl. geb. um 1920), sowjetischer Ingenieur, Professor am Allunionsinstitut für Fotokinotechnik (NIKFI), Autor zur Rasteroptik

van Berkel, Cees

Cees van Berkel (geb. 1958), niederländischer Physiker, Display-Spezialist und Datenwissenschaftler

Van Slyke, Steven

Steven Van Slyke (geb. 1956), amerikanischer Ingenieur, Forscher bei Eastman Kodak, CTO bei Kateeva, gilt als Erfinder der OLED (gemeinsam mit Tang)

Vasari, Giorgio

Giorgio Vasari (1511–1574), italienischer Architekt, Maler und Kunsthistoriker, Verfasser eines umfangreichen Werks von Künstler-Biographien (mehr als 300 Künstler), prägte die Begriffe Gotik und Renaissance

Vaucanson, Jacques

Jacques de Vaucanson (1709–1782), französischer Ingenieur, Chefinspekteur der Seidenmanufakturen, Konstrukteur von Automaten

Vermeer

Jan Vermeer van Delft (1632–1675), niederländischer Maler

Vesalius, Andreas

Andreas Vesalius, eigentl. Andreas Witinck (1514–1564), flämischer Arzt und Anatom, Professor für Chirurgie und Anatomie in Venedig und Padua

Vieth, Gerhard

Gerhard Ulrich Anton Vieth, auch G. U. A. Vieth (1763–1836), deutscher Lehrer, Professor für Mathematik in Dessau verfasste einige mathematische Abhandlungen, wird wie Guts Muths oder Jahn zu den „Turnvätern“ gezählt

Vignola, Giacomo

Giacomo Barozzi da Vignola (1507–1573), italienischer Architekt, Maler und Perspektivzeichner

Vitruv

Vitruv, selten auch Marcus Vitruvius Polli (ca. 80 v. Chr. – ca. 15 v. Chr.), römischer Architekt und Ingenieur, sein Hauptwerk sind die „Zehn Bücher über Architektur“

Voigt, Woldemar

Woldemar Voigt (1850–1919), deutscher Physiker, Professor für Physik in Königsberg und Göttingen, bekannt vor allem für seine Arbeiten in der Elektrooptik und Kristallphysik

Voltaire

Voltaire, eigentl. François-Marie Arouet (1694–1778), französischer Philosoph und Gesellschaftskritiker

Wackefels, Johannes

Johann Matthäus Wacker von Wackefels (1550–1619), deutscher Jurist und Diplomat, Freund Keplers

Walch, Johann

Johann Ernst Immanuel Walch (1725–1778), Philologe und Geologe, Professor für Philosophie, Logik und Rhetorik an der Universität Jena

Walgenstein, Thomas

Thomas Walgenstein, eigentl. Thomas Rasmussen Walgenste(e)n, auch Thomas Erasmi Gotlandus oder Walgenstenius (1627–1681), dänischer Mathematiker, wird als der Erfinder der Laterna magica gehandelt

Waller, Fred

Frederic Waller (1886–1954), amerikanischer Erfinder und Filmschaffender, Mitarbeiter bei Paramount, Erfinder des Viterama-Panoramakinos, Oscar 1953 für das Cinerama

Weigel, Erhard

Erhard Weigel (1625–1699), deutscher Mathematiker, Professor für Mathematik und zeitweise Rektor der Universität Jena, bekannt für das „Weigelsche Haus mit Fahrstuhl und Weinzapfanlage – eines der „sieben Wunder“ Jenas

Weinbaum, Stanley

Stanley G. Weinbaum (1902–1935), amerikanischer Schriftsteller, Science-Fiction-Autor

Wheatstone, Charles

Sir Charles Wheatstone (1802–1875), britischer Physiker, Professor für Experimentalphysik am King's College in London, bekannt für die Entwicklung der Wheatstoneschen Messbrücke und des Stereoskops

White, James

James White (1824–1884), schottischer Optiker, Instrumentenmacher der Universität Glasgow, insbesondere für William Thomsons Labor

Wiener, Christian

Ludwig Christian Wiener (1826–1896) deutscher Mathematiker, Professor für Geometrie in Karlsruhe, Verfasser eines Lehrbuchs zur Darstellenden Geometrie

Wilkins, John

John Wilkins (1614–1672), englischer Geistlicher und Gelehrter, Leiter des Wadham College in Oxford, Master des Trinity College in Cambridge, Bischof von Chester, Gründungsmitglied der Royal Society, Verteidiger des Kopernikus, Entwickler einer universellen philosophischen Sprache

Willème, François

François Willème (1830–1905), französischer Künstler, Entwickler der Foto-skulptur-Kopie

Williams, Richard

Richard Williams (geb. 1927), amerikanischer Chemiker, forschte zu Flüssigkeitskristallen bei RCA

Winnek, Douglas

Douglas Fredwill Winnek Coffey (1907–1999), amerikanischer Erfinder, Sohn des Bigamisten und Mörders William Noah Coffey

Witelo

Witelo, auch Witelo de Viconia oder Vittelio (ca. 1237–1285), thüringisch-schlesischer Mönch und wissenschaftlicher Autor auf dem Gebiet der Optik

Wittmann, Marc

Marc Christoph Wittmann (geb. 1966), deutscher Psychologe, forscht insbesondere zur Psychologie der Zeit

Wolf, Max

Maximilian Franz Joseph Cornelius Wolf (1863–1932), deutscher Astronom, Professor für Astronomie in Heidelberg, Direktor der Sternwarte Heidelberg

Wollaston, William

William Hyde Wollaston (1766–1828), englischer Arzt und Chemiker, Privatgelehrter, Mitglied und Präsident der Royal Society, entwickelte eigene Geräte zur Naturbeobachtung, Entdecker des Palladiums und Rhodiums

Woltersdorff, Johann

Johann Lucas Woltersdorff (1721–1772), Prediger der St. Gertrud-Kirche in Berlin und Mineraloge

Woltring, Herman

Herman Jozef Woltring (1943–1992) niederländischer Psychologe und Mathematiker, Biomechaniker, Professor an der Universität von Nijmegen

Xenophanes

Xenophanes von Kolophon (570 v. Chr. – 475 v. Chr.), griechischer Philosoph, Kritiker von Homers und Hesoids Götterwelt, nach seiner Ansicht schufen die Menschen die Götter nach ihrem Vorbild

Xenophon

Xenophon (430 v. Chr. – 425 v. Chr.), griechischer Philosoph und Politiker, Schüler des Sokrates, schuf mit „Oikonomikos“ ein Werk über die Ökonomie, mit „Hipparchikos“ das erste Buch über die Reitkunst

Young, Thomas

Thomas Young (1773–1829), britischer Mediziner und Physiker, forschte zur Akkommodation des Auges und zur Wellentheorie des Lichtes, Entzifferer ägyptischer Hieroglyphen

Zahn, Johann

Johann(es) Zahn (1641–1707), deutscher Mathematiker und Optiker, Professor für Mathematik in Würzburg, Chorherr im Orden der Prämonstratenser

Zanoni, Louis

Louis A. Zanoni (1933–2018), amerikanischer Ingenieur, Mitarbeiter Hellmeiers bei RCA, Gründer Mitbegründer des Digitaluhrenunternehmens Optel und Gründer von Zantech (Service für Digitaluhren)

Zeduan, Zhang

Zhang Zeduan od. Chang Tse-tuan (1085–1145), chinesischer Maler, Schöpfer der Qingming-Rolle

Zeuxis

Zeuxis von Herakleia (um 500 v. Chr.), griechischer Maler, malte den Palast des Archelaos aus, berühmt für seine natürliche Malerei

Zimmerman, Tom

Thomas G. „Tom“ Zimmerman (geb. ca. 1957), amerikanischer Ingenieur, Entwickler bei VPL, Forscher am MIT Media Lab und bei IBM Research

Zöllner, Frank

Frank Zöllner (geb. 1956), deutscher Kunsthistoriker, Professor für Kunstgeschichte an der Universität Leipzig

Zuse, Konrad

Konrad Ernst Otto Zuse (1910–1995), deutscher Ingenieur und Erfinder, Entwickler des ersten Computers Z3, Entwickler der Programmiersprache „Plankalkül“

Stichwortverzeichnis

- 2D, 279
Ausgabe, 279
Bildschirm, 3
Display, 280
Eindruck, 219
Plot, 352
Projektion, 91
- 3D, X, XI, XII, 1, 8, 9, 260, 264
Anaglyph, 243
Anzug, 368
Bild, 228, 234, 236, 239, 244, 253, 265, 273, 312, 314
Bildschirm, 3, 367
Brille, 1, 3, 10, 226, 228, 230, 239, 240, 247, 250, 261, 311, 367, 368
Darstellung, 10, 244, 245, 249, 254, 270, 300, 348, 353
Display, 4, 230, 260, 278–281, 288, 349
Druck, X, 1, 5, 43, 338, 339, 345, 349, 351–353
Effekt, 231, 232, 247, 249, 252, 261, 262, 264
Fernseher, X, 228, 245, 247
Film, 227, 228, 242, 245–247, 306
Filter, 239, 241
Kino, 238, 241, 243
Maus, 328
Modell, 228, 343, 345
Modus, 279
Monitor, XI, 4, 226, 279
Objekt, 230, 328, 339, 343, 345, 349, 352
Präsentation, stereoskopische, 226
Programm, 342
Prototyping, 353
- Raum, X, 219, 265, 320
Rekonstruktion, 91
Scan, 342
Sehen, 3, 227, 250, 259, 309
Sensor, 328
Skulptur, 337
Sound, 304
System, 350
Szene, 232, 240
Technik, X
Technologie, 8
Wahrnehmung, 11, 219
Welt, 368
- 3SPACE, 318
4D, XII
- A
Abathochroal, 24
Abbildung
anamorphe, 2
dreidimensionale, 366
Abbildungsqualität, 214, 346
Abiotikum, 18
Acridinorange, 197
Aisthesis, 63
Akkommodation, 131, 215, 230
Akkommodations-Konvergenz-Problem, 368
Alternate-Frame Technique, 238
Ames-Raum, 256
Anaglyph, 240, 243
Bild, 232
Brille, 241
Film, 243
Infitec-Anaglyph, 241

- Technik, 240
 Anamorphose, 99, 103, 287
 Anatomie, 30, 32, 35, 41, 67, 94, 127
 Animal Locomotion, 180
 Anordnung
 dreidimensionale, 176
 hexagonale, 24, 26
 zweidimensionale, 176, 286
 Anorthoskop, 168, 169, 172
 Anthracen, 197
 Anzeige, stereoskopische, 278
 Apeiron, 49, 50, 52
 Apeitheia, 63
 Aphrodite, 220
 Apposition, 27
 AR s. Augmented Reality
 Architekturstil, 77, 79
 Argand-Brenner, 173
 Argand-Lampe, 173, 174
 AromaRama, 311
 Ars magna lucis et umbrae, 143, 145
 Artificial Reality, 14
 Astronomia Nova, 126
 Äther, 50
 Atomismus, 56
 Auflichtprojektor, 156
 Auflösung, X, XII, 2, 3, 5, 12, 26, 187, 188, 195, 215, 245, 247, 264, 266, 269, 278, 279, 281, 288, 368
 Aufnahme, stereoskopische, 232
 Auge
 magisches, 253
 reduziertes, 35
 schematisches, 38
 Augenabstand, 227, 228, 268
 Augenblicksphotographie, 182
 Augenlinse, 32, 67, 130, 230
 Augmented Reality, XI, 325
 Augpunkt, 96, 97, 102, 287
 Auslese, natürliche, 18, 30
 Automultiscopy, 10
 Autostereoskopie, 3, 5, 8–10, 260, 263, 270, 272, 274
 Avatar, 313, 337, 369
- B**
 Barriere, 260, 263, 268, 270, 272, 273, 278–280
- Kino, 272
 Parallax-Barriere, 270, 272, 281
 Beobachtung, monokulare, 254
 Bernotar, 242
 Betrachtung
 binokulare, 255
 monokulare, 219
 Betrachtungspunkt, zyklischer, 221
 Bild
 anamorphes, 168
 dreidimensionales, 237, 270
 stereoskopisches, 240, 249, 251, 263
 zweidimensionales, 99, 250
 Bildpaar, 227, 228, 231, 234, 238, 263
 stereoskopisches, 10, 176, 228, 234, 235, 247, 270
 Bildpunkt, 28, 194, 224, 281
 Bildröhre, 187, 274, 281
 Bildsatz, stereoskopischer, 173
 Bildwiedergabe, autostereoskopische, 270
 Bildwiederholfrequenz, 229
 Bildwiederholrate, 187, 195, 244
 Binokularsehen, 146, 222, 223, 231, 273
 Biscenescope, 162
 Blick, zyklischer, 258
 Braunsche Röhre, 279
 Brille, stereoskopische, 237
 Buch, hermetisches, 48
 Bullet-Time, 181
- C**
 Cameo, 254
 Camera
 clara, 135
 clausa, 131
 lucida, 135–137
 obscura, VIII, 3, 34, 42, 122, 125, 127–129, 131, 132, 135–137, 141, 143, 145, 154, 157, 232, 257, 269, 273, 365
 ottica, 139
 CAVE, 315
 Cholesterin, 189
 Cholestrylacetat, 189
 Cholestrylbenzoat, 189
 Chronophotographie, 182, 183
 Cinématographe, 186
 CINERAMA, 304, 306
 Codex

- Atlantico, 96, 127, 139
Leicester, 129
Urbinus Latinus, 94, 95
Vallardi, 85
Vindobonensis Palatinus, 126
Collegium Curiosum, 149
Computer Aided
 Design, 350
 Manufacturing, 350
Computertomografie, 71, 339
Computer-Vision, 27
Conchites trilobus, 23
Corpus vitreum, 30
Costruzione legittima, 90
Coup d'Œil, 300
Cubic Mouse, 329
Cubomedusae, 22
Cubozoa, 20
- D**
- Dädaleum, 170, 171, 177
Darstellung
 autostereoskopische, 263
 binokulare, 10
 stereoskopische, 253
DataGlove, 318
DataSuit, 318, 322
Daten
 dreidimensionale, X
 zweidimensionale, XI, 11
De anima, 60
De architectura libri decem, 72
De corporis humani structura, 32
De humani corporis fabrica libri septem, 32
Defekt, pseudoskopischer, 266, 269
Deferent, 126
Destriau-Effekt, 196
Determinismus, 56
Dia, 148
 Diabetrachter, 139
 Diapositiv, 148
 Diaprojektor, 151
 Show, 143
Die Elemente (Buchtitel), 60
Dioptrica, 34, 141
 nova, 152
Dioptrik, 39, 67
Diorama, 300–302
Dioramic Views, 302
Disparation, 146, 224
Disparität, 226–228, 252, 253, 342
 binokulare, 258
Dispersion, 253
Display
 autostereoskopisches, 237, 278, 288
 dreidimensionales, 279
Disruption, VIII
Dissolving views, 158, 162
Divergenz, temporale, 230
Divina proportione, 93
Dodekaeder, 94
Dolby, 241
Doppelbild, 226, 228, 230, 251, 348
Doppelporträt, 106
Doppelrasterprojektion, stereoskopische, 263
Doppelzehen, 220, 221, 251
Dreieckszahl, 53
Dreifaltigkeit, 106
Dreitafelprojektion, 91
Drucktechnik, dreidimensionale, 351
Dry Shooter, 306
Dualismus, cartesianischer, 69
Duftorgel, 310
Dunkelkammer, 122, 125–127, 132, 137, 337
Dünnschichttransistor, 195
- E**
- Ebene, zweidimensionale, 26
Ediacara-Fauna, 19
Effekt
 stereoskopischer, 239
 stroboskopischer, 183, 186
Efflux, 62
Eidola, 57, 65
Eindruck, zweidimensionaler, 219
Einfachsehen, 220, 221
Einkristall, 196, 197
 anorganischer, 197
Einstzsche Gleichung, 51
Elektrolumineszenz, 196, 197
Elektronenstrahl, 320, 352
Elektrotachyscop, 185
Emanation, 62
Emissionstheorie, 50, 60, 62
Entomolithus paradoxus, 23
Episkop, 156

- Epithelfilm, 23
Epizykel, 126
Erdaltezeit, 18
Erdfrühzeit, 18
Erkenntnistheorie, 47, 68, 309
Euglena, 19
Evolution, VIII, 18, 19, 30, 46, 214
Evolutionstheorie, 18
Exoskelett, 23, 330, 331
Experience-Theather, 309
Explosion, kambrische, 18, 19, 21
Exzess, binokularer, 228
- F**
Facettenauge, 23, 26, 28, 29
Fantascope, 160, 161, 167, 169
Fantasmagorie, 160, 302
Farbfernseher, 2
Farbfilter, 3, 197, 198, 239–241, 245, 280, 281
Farbtiefeinwirkung, stereoskopische, 253
Farbwahrnehmung, 2
Fernsehapparat, stereoskopischer, 309
Fernsehen, 187, 249, 273, 348
 stereoskopisches, 274
Fernseher, 2
Filmkamera, 186
Finestra aperta, 90
Fischgrätenthese, 79
Fläche, zweidimensionale, 43
Flüssigkeitskristall, 189, 191
Flüssigkristall, 190–192, 194–196, 201, 244,
 247
 Anzeige, 191, 195, 198, 244
 Bildschirme, 191, 195
 Brillen, 247
 Display, 354
Flying spot scanner, 187
Fossil, dreidimensionales, 19
Fotografie, dreidimensionale, 348
Fotometrie, 282, 283
Fovea centralis, 215, 216
Freeze Frame, 181
Froschperspektive, 95
Frozen Moment, 181
Führungsauge, 214
Funktion, plenoptische, 283, 285
Fused Deposition Modeling, 352
Fused Filament Fabrication, 352
- Fusil photographique, 183
Fusion, 226, 230, 250
 Fusionszwang, 230, 251
 stereoskopische, 239
- G**
Galileisches Fernrohr, 34
Galliumnitrid, 196, 197
Gebäude, dreidimensionales, 81
Gegenauge, 311, 368
Gegenstück, dreidimensionales, 336
Genesis, 49
Geruchskino, 309
Gesichtsfeld, 220, 259, 303
Gewehr, fotografisches, 183
Gitter, 26, 166, 326, 327
 Beugungsgitter, 325, 327
 Bravais-Gitter, 326
 Gitterstruktur, 274
 optisches, 325
 perspektivisches, 272
 Raumgitter, 353
Glaskörper, 38, 41, 46, 215
Glasübergangstemperatur, 351
Glimmerschirm, 187
Globuli, 269
GLOWFLOW, 314, 315
Google Glass, 325
Größe, relative, 217
Grubenauge, 20
Gullstrand-Auge, 39
- H**
Hades, 49
HAL (Roboteranzug), 330
Handyman, 330
Hardiman, 330
Harfenbild, 106
Head-Mounted-Display, 4, 135, 314, 318, 323
Heliochromie, 265, 266
Helmholtz-Ringe, 178
Hermes, 48
Herotar, 242
Hexaeder, 94
Hexe von Endor, 158
Höhe, relative, 217
Höhlengleichnis, 13, 315

- Höhlenmalerei, 45
Hollow-Face-Illusion, 254, 265
Holochroal, 23, 24
Holodeck, 4, 312, 368
Holografie, XI, 5, 8–12, 346, 348, 367, 368
Hologramm, XII, 5, 7–9, 12, 163, 312,
 345–348, 365, 368
 In-Line-Hologramm, 348
Holograph, 7
Hololens, 325, 326, 328
Holoskop, 12
Holoskopie, 8
Hornhaut, 23, 24, 37, 39, 42, 46, 215
Horopter, 224, 226
 empirischer, 226
 Horopterabweichung, 226
 tatsächlicher, 225
 theoretischer, 225
Humor
 aqueus, 32
 crystallinus, 32
 vitreus, 32
Hydrocarotin, 189
Hypostasen, 106
- I**
Ikonenmalerei, 82
Ikosaeder, 94, 95
Ilias, 49
Illusion, monokulare, 256
IMAX 3D, 304
Information, zweidimensionale, 313
Infrarot, 196, 317, 321
Infusionthierchen, 19
Inkrustationsstil, 77
Innovation, VII, 183, 352
Instrument, binokulares, 255
Intaglio, 254
Integralfotografie, 11, 264, 266–268, 270, 272,
 273, 288, 368
Interaktion, IX, 4, 5, 63, 311, 313, 314, 320,
 324, 328, 329, 368
Interferenz, 265, 347
 Bild, 5
 destruktive, 326
 konstruktive, 326
 Muster, 5, 347
Introskop, 339
Isoluminanz, 283
- J**
Jakobsstab, 102, 125
- K**
Kaleidophon, 166
Kaleidoskop, 166
Kalklicht, 174
Kambrium, 18, 23, 29
Kamera, 5, 122, 127, 129–132, 134, 151, 157,
 181, 183, 249, 266–269, 286, 314, 321,
 322, 337, 339, 368
Kameraposition, 286, 337
Kamerasensor, 215
Karborund, 196
Kathodenstrahl, 7, 187
Kathodenstrahleröhre, 187, 273, 345
Katoptrik, 80
Keplersche Vermutung, 26
Kerr-Effekt, 190
Kerr-Zelle, 191
Kinästhetik, 311
Kinematograph, 186
Kinetoskop, 185, 229
KMQ-Verfahren, 238
Kohärenz, 347, 348
Kohlenstoff, 197
Kollision, platonische, 62
Komplementärfarbe, 241
Komplementarität, 51
Komplexauge, 27
Konservatlagerstätte, 21
Kontrast, 195, 196, 198, 200, 328
Konvergenz, 215, 230
Kopie, dreidimensionale, 350
Körper
 archimedischer, 94
 platonischer, 94
Kreuzblick, 3, 250, 252
Kristall
 flüssiger, 189, 190
 organischer, 197
Kristalllinse, 38
Kristallphysik, 189, 190
Krokodilskot, 48
Kromolinoskop-Kamera, 263
Kromskop, 263
Krümmung
 aspäräische, 141
 hyperbolische, 141

- Kugelpackung, 24
 Kugelwelle, 149
 Kybernetik, 214, 369
- L**
- La machine animale, 180
 Lakonisieren, 47
 Lamellenbild, 106
 Laminated Object Manufacturing (LOM), 338
 Lanterne de peur s. Laterne der Angst
 Laser, 5, 9, 339, 346, 348, 352, 354
 Laserschmelzen, 351
 Lasersintern, 351
 Latenz, 230
 Laterna
 magica, 137, 139, 141–143, 145–150, 153, 154, 156–158, 160, 162, 273, 366
 megalographica, 151, 152
 thaumaturga, 151
 Laterne der Angst, 147
 Laufband, 329, 369
 LC s. Liquid Crystal
 LED s. Light Emitting Diode
 Lehrschaukel, 305
 Lentikular, 270
 Leuchtdiode, 196
 Leuchtdiodendisplay, 201
 Licht, monochromatisches, 347
 Lichtfeld, 6, 11, 12, 282, 283, 286–288
 dreidimensionales, 11
 vierdimensionales, 287
 Lichtfeldkamera, 11, 267
 Lichtsinn, 18
 Light
 field, XI, 11, 327
 pen, 313
 slab, 286, 287
 Light Emitting Diode (LED), 196–199
 Bildschirm, 197, 198
 Display, 198, 199
 Fernseher, 198
 Hintergrundbeleuchtung, 198
 organische (OLED), 197, 198
 AMOLED, 198
 Bildschirm, 198
 WOLED, 198
 Lincoln Wand, 313
 Link Trainer, 305
- Linsenauge
 distales, 21
 proximales, 21
 Liquid Crystal (LC), 247, 279
 Barriere, 280, 281
 Bildschirm, 196, 198, 245
 Display (LCD), 192, 196–198, 200, 241, 244, 245, 247, 279, 281
 Farb-LCD, 280
 Institute, 191
 Lagen, 279
 Monitor, 240
 Panel, 279, 281
 Schicht, 245, 354
 Technik, 247, 288
 Lochkamera, 122, 128, 129, 131, 270, 273
 Lossew-Effekt, 196
 Lucerna
 catopirica, 143, 144
 magica, 143, 145, 148
 Luftperspektive, 95, 216
 Lumigraph, 12, 287
- M**
- Magia
 anamorphotica, 104
 naturalis, 129, 131
 Magic Leap, 323, 325, 327, 328
 Magick Lantern, 152
 Malerei, byzantinische, 83, 84
 Marionette, grafische, 320
 MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), 9
 Material, organisches, 197
 Materialismus, 56
 Matrix
 aktive, 195, 198
 passive, 194
 Media-Room, 320
 Medium, zweidimensionales, 5
 Meeresleuchte, 51
 Megalographie, 151
 Mehet-weret, 48, 49
 Metamorphe, 30
 Metaphysik, 63
 METAPLAY, 314
 Micrographia (Buchtitel), 134
 Micrographia nova (Buchtitel), 149

- Minkowski-Raum, 62
Mixed Reality, XI, 88, 232
Mocap, 322
Moiré, 274, 275, 277, 278
 Effekt, 275, 278
 Moirélage, 276
 Moirémuster, 274
 Stoff, 274
 Streifen, 262, 278
Molyneux-Problem, 153
Mondregenbogen, 51
Monitor, autostereoskopischer, 263, 367
Moskauer Rasterschirm, 272
Motion Capture, 321
Motograph, 261, 262, 274
MR s. Mixed Reality
Multiperspektive, 79, 99
Multiplexing, 249
 räumliches, 249
 zeitliches, 249
Muschelstein, 23
Muster, binokulares, 252
Mutation, 29, 30
- N**
Naheinstellungstrias, 131, 215, 234
National Television Systems Committee (NTSC), 194
Nebelbild, 157, 162, 163
Netzhaut, 32, 33, 35, 46, 67, 165, 177, 222, 224, 226, 230
 Netzhautbild, 28, 29, 218, 226, 227, 231, 249, 253
 Netzhautgrube, 215
Nichteuklidisch, 61
- O**
Objekt, dreidimensionales, 349
Objektiv, 34, 130, 132, 134, 135, 146, 148, 149, 227, 239, 244, 255, 263, 271, 273, 345, 346
Objektivlinse, 175
Objektivrohr, 153
Objektivtubus, 156
Oculus, 33, 34, 36, 131, 323, 325
 artificialis, 151
Oktaeder, 94
- Okular, 34, 234, 236, 239, 302, 309, 367
 Okularlinsen, 234, 236
OLED s. Light Emitting Diode (LED), organische
Ommatidien, 23, 24
Omnia opera, 31
Optica
 Eugenius von Palermo, 62
 Euklid, 60
 Kepler, 67
 Schott, 143
 Witelo, 32
Opticae thesaurus, 32
Opuscula Posthuma, 37
Orakel von Delphi, 58
Ornamentstil, 77
Oszilloskop, 9, 187
Oumuamua, 332
- P**
Paläozoikum, 18
Panorama, 300, 304, 309, 311
Panoramagramm, 271, 273
Panscopium, 233, 234
Pantograf, 337
Papyrus Ebers, 48
Paraflagellarkörper, 20
Paralipomena, 67, 130
Parallaxe, 218, 251, 272, 273
 Bewegungsparallaxe, 218, 219, 227, 228, 258, 271, 348
 negative, 251
 Parallaxenfehler, 246
 positive, 251
 vertikale, 288
 Zeitparallaxe, 3, 249, 259
Parallelblick, 223, 251, 252
Parallelenaxiom, 61
Pepper's ghost, 162
Pepper-Ghost-Illusion, 302
Permutation, 240
Perspektive, IX, VII, XI, XII, 2, 3, 5, 7, 11, 12, 18, 69, 71, 77–79, 81–84, 87, 89–91, 94, 95, 98–100, 103, 105, 107, 127, 139, 157, 216, 219, 228, 229, 231, 255, 257, 259, 267–269, 273, 282, 287, 288, 311, 365, 367
Perspektograph, 9, 96, 97, 99, 102

- Petrefakt, 23
Phaidon, 59
Phänakistikop, 167
Phantasmagorie, 158–160
Phantasmaskop, 167
Phantom, 369
Phantomatik, 4, 14
Phantomologie, 14
Phase, 5, 188, 284, 346, 347
 nematische, 193
 Phasenunterschied, 346
 Phasenverschiebung, 347
Phenakistiskop, 167, 168, 172, 175–177, 183, 240
Phorolyt, 175
Phoroskop, 175, 176
Photic field, 283
Photo-Glyph, 343
Photorezeptor, 20
Photoskulptur, 338, 340, 342
Phototaxis, 20
Piloteur, 305
Pixel, 5, 195–199, 245, 247, 252, 275, 279–281, 288, 353
 LC-Pixel, 280
 Subpixel, 240, 241, 280, 281
 Volumen Pixel, 353
Plancksches Wirkungsquantum, 51
Planisphaerium, 81
Plasma, 200
 Bildschirm, 201
 Display, 200
Pleorama, 303
Pneuma, 63–65
 physicon, 63
 psychikon, 63
 zotikon, 64
Polarisation, 3, 189, 190, 192, 197, 242, 243, 245, 246
 Analysator, 242, 244, 245
 Brille, 245, 247
 Drehung, 244
 Elemente, 245
 Fähigkeit, 189
 Filter, 192, 243, 245
 Mikro-Polarisator-Array, 245
 Polarisator, 197, 198, 242–246
Polbrille, 243
Polfilter, 242–245, 247, 354
Richtung, 192, 247
Winkel, 244
zirkulare, 244
 Zustand, 198, 241, 244, 284
Politeia, 59
Polyeder, 94
Polymer, 198, 349, 351
Polymerisation, 349
Polyorama, 302
Polyoskop, 302
Pompeji, 77, 78
Ponderation, 95
Power Glove, 319
Praxinoskop, 179
Prekambrium, 18
Problemata physica, 220
Projektion, 30, 43, 76, 77, 79, 81, 91, 97, 102, 103, 122, 127, 128, 131, 138–141, 146, 149, 154, 157, 162, 171, 175, 179, 183, 185, 186, 227, 244, 246, 273, 303, 354, 367
 Fläche, 130, 187, 315, 345, 354
Laterne, 137, 146, 149
Leinwand, 303
Praxinoskop, 179, 180
stereoskopische, 242
Vorrichtung, 145
Wand, 132, 148, 354
Projektor, dreidimensionaler, 345
Proportion, 94, 95
Prospectiva pingendi, 90
Protean Views, 302
Protrusion, 24
Prozess, stereoskopischer, 252
Pseudoskop, 265, 266
Pseudoskopie, 265
Pulfrich-Effekt, 249, 259, 260
 monokularer, 260
Pupillary near reflex, 215
Pupille, 31, 35, 54, 55, 58, 64, 66, 128, 215, 224
 Durchmesser, 215, 230
 Größe, 215
 Nahreflex, 215
 Verengung, 131
Pygmalion, 13, 333, 368

Q

Quanten, 50, 51
Quaternionen, 190, 319
Quinacrin, 197

R

Rabulisterei, 52
RAND-Tablet, 313
Rankine-Welle, 177
Raster, 97, 103, 261–263, 268, 272–274, 278, 279, 281
Anzeigeraster, 188
Barriereraster, 271, 273, 275, 288
Bild, 262
Bildraster, 187, 188
Doppelrasterprojektion, 263
Geweberaster, 96
Grundraster, 275
Kreuzraster, 269
Levy-Raster, 269
Linienraster, 275, 277, 278
Linienrasterfotografie, 269
Linsenraster, XI, 11, 264, 265, 267, 269–273, 275, 278, 287, 288, 367
Lochraster, 272, 273
Mikrolinsenraster, 27
Moskauer Rasterschirm, 272
optisches, 3
Pixelraster, 275
Platte, 269
Punkt, 103, 287
radiales, 272
Rasteroptik, 269
Schirm, 271
Streifenraster, 262, 269
Weite, 275
Zaun, 261
Zylinderlinsenraster, 270, 273

Raum
dreidimensionaler, XI, XII, 61, 322
euklidischer, 61
vierdimensionaler, XII
Raumbild, X, 1, 232, 239, 252, 255, 348, 367
Raumbildtechnik, X, 6, 8
Raumgitter, dreidimensionales, 353
Raumklang, 304, 306
Raumsehen, 2, 214, 219, 227, 259, 269, 271
Raumwahrnehmung, XII, 216, 226, 228, 249

binokulare, 220

Raumwirkung, binokulare, 226
Raumzeit, vierdimensionale, 190
Realität, virtuelle, VIII, XI, XII, 4, 6, 12–14, 43, 57, 59, 68, 312, 313, 315, 318, 324, 328, 365, 366, 368
Brille, 1, 226–229, 236, 309, 323, 367
Display, 365
Suit, 323
Technik, XI
Relativitätstheorie, 50, 62, 190
Relief, monokulare, 255
Renaissance, 2, 81, 83, 85, 86, 100, 216
Renaissancemalerei, 84
RepRap, 353
Retarder, 245
Retina, 21, 30, 32, 67, 230
Revelator secretorum, 125
Revolution, VII, 160, 328, 335, 353
Révolver photographique, 182
RGB-Farbraum, 198, 240, 241
Filter, 241
Grundfarben, 253
Pixel, 196, 198, 199
Subpixel, 280
Riefelbild, 104, 107
Rocking Nacelle, 305
Röhre
braunsche, 187
geißlersche, 185
Röhrenmonitor, 188, 281
Rosa ursina, 33
Rotunde, 300, 337, 367, 368

S
Saphir, 197
Satz des Pythagoras, 52
Saugröhre, 21
Sayre-Glove, 315
Scentovision, 310
Schadt-Helfrich-Zelle, 193, 247
Schattenbild, 339
Schattenprojektion, 77
Schatz der Optik, 32, 83
Scheibe
stampfersche, 170
stroboskopische, 167, 175, 183
Schichtbild, 338, 339, 343, 354

- Schießkino, 304, 305
Schizochroal, 23, 24
Schlitzauge, 20
Schnellseher, 157, 184
Schnitt, zweidimensionaler, 287
Schnittbild, 339, 343
Schreckenslampe, 3, 137
Schreckenslaterne, 154
Schwefelkohlenstoff, 190
Segmentanzeige, 193
Seheindruck, dreidimensionaler, 226
Sehen, peripheres, 215, 309
Sehkegel, 90, 220, 221
Sehpymamide, 66, 90
Sehstrahlen, 55, 61, 65, 90
Selen, 187
 Empfänger, 187
Sensor, zweidimensionaler, XII, 20
Sensorama, 309, 311
Separation, 239, 262
Shutter, 3, 229, 244, 247–249, 349
 Anordnung, 239
 Brille, 247
 Shutterbrille, 229, 247
Side-by-Side, 198, 237
Sieben Weisen, 47, 49
Simulator, 306, 369
 Fahrradsimulator, 329
 Flugsimulator, 305, 306
 Simulatorkrankheit, 230
 Umgebungssimulator, 309
Single-Pixel-Kamera, 5, 187
Siphonen, 21
Siphonophoren, 21
Skene, 73
Skenographie, 72, 78, 80, 102
Sketchpad, 313
Sklera, 24
Smartphone-Kamera, VIII
Smell-O-Vision, 311
Solidifikation, 351, 353
Sonnenauge, 49
Sonnenmikroskop, 3, 154, 156
Sonnenstein, 242
Spektrum, 6, 55, 241, 280
Sphygmos, 64
Spiegelkunst, 71, 139, 145
Spiegelreflexkamera, 134, 151
Staatsqualle, 21
Stablinse, 264
Stereo-Äquivalenz, 214
Stereobild, 234, 236, 237, 239, 249, 251, 253, 255, 265, 309, 337
Stereobildpaar, 226, 229, 238, 239, 251, 262, 342
Stereogramm, 9, 252, 263
 Autostereogramm, 252
 Parallax-Stereogramm, 263, 269, 270, 273, 274
 Random-Dot-Stereogramm, 252
 zusammengesetztes, 274
Stereokamera, 227, 314, 342
Stereokomparator, 249
Stereolithografie, 345, 350
Stereophorolyt, 176
Stereophoroskop, 176, 177
Stereo-Prävalenz, 214
Stereopsis, 226
Stereoskop, 1, 4, 8, 9, 173, 176, 231, 237–239, 251, 261–263, 300
 brewstersches, 234–236
 Cardboard-Stereoskop, 236
 chromatisches, 253
 Farbenstereoskop, 239
 freiäugiges, 237
 Kromoskop, 263
 lageadaptives, 236
 Linsenstereoskop, 176
 Reflexionsstereoskop, 234
 Spiegelstereoskop, 173, 176, 231, 234, 251
 Wand- und Hand-Stereoskope, 238
 wheatstonesches, 232
Stereoskopie, X, 3, 8–10, 239, 251, 254, 262, 269, 272, 367
Stil
 monochromatischer, 75
 pompejanischer, 77
Stoiker, 63–65
Streifen, 77, 247, 263, 269, 273, 279, 326
 Bild, 263, 342
 Elektroden, 194
 Gitter, 261
 Lichtscanner, 71
 Maske, 187
 Moiré-Streifen, 262
 Projektion, 343
 Raster, 262, 263, 269
 Stroboskopbeleuchtung, 186

- Stroboskopscheibe, 184
Struktur
 autostereoskopische, 5
 dreidimensionale, 190
Styx, 49
Summa technologiae, 13, 311
Sunny Ocean Studios, 278, 288
Superposition, 27
Surface Relief Gratings, 325
Synopter, 255
System, visuelles, VIII, 214, 218, 227, 229
Systema
 minerale, 23
 naturae, 23
Szene, dreidimensionale, 5
- T**
- Technologie
 autostereoskopische, 367
 stereoskopische, 367
- techXpert, 278
- Telepräsenz, 311, 313, 314, 318, 330, 369
- Teleskop, 9, 122, 131
- Telesphere, 310, 311
- Television, 273
- Televistor, 187, 188
- Tensor, 189, 190
- Tetraeder, 94
- Tetrakty, 53
- Textur, 217
- Thaumatrop, 163, 164, 167, 170, 254
- Thaumaturg, 145, 151
- Thaumaturgie, 257
- Théâtre optique, 185, 186
- Thermolampe, 173
- Thin Film Transistor (TFT), 195
- Thot, 48
- Three-Way-Picture, 106
- Tiefenfaktor, monokularer, 259
- Tiefenkriterium, monokulares, 218, 224
- Tiefensehen, 226, 227
 monokulares, 255
- Tiefenwahrnehmung, monokulare, 227
- „Time-of-Flight“-Kamera, 342
- Time Slice, 181
- Top-Down, 238
- Tractatus opticus, 145
- Traite de la lumiere, 149
Trattato della pittura, 94, 95, 231
- Tretmühle, 329, 369
- Trikolograph, 97
- Trilobit, 23, 26
- Trinität, 106, 107
- Trisceneorama, 106
- Tunica, 31
 cornea, 32
 reti similis, 32
 uvea, 32
- Twisted Nematic (TN), 193
 Display, 193
- U**
- Über die Seele (Buchtitel), 60
- Umgebung, dreidimensionale, 43
- Undulationstheorie, 50
- Uomo universale, 139
- Urstoff, 49
- V**
- Venus
 vom Hohlefels, 43
 von Willendorf, 43
- Verant, 255
- Verfahren, autostereoskopisches, 267
- Verwischungstomograph, 339
- VIDEOPLACE, 314
- Vierheit, 53
- Vieth-Müller-Kreis, 225
- VIEW lab, 314
- View Magic, 239
- Virtual Reality (VR) s. Realität, virtuelle
- Virtualisierung, periphere, 5
- Virtualität, 315, 353, 367
 fiktive, 367
 reale, 331, 332, 367
- Visio non fit extramittendo, 60
- Vitarama, 303, 304
- Volume Bragg Gratings, 325
- Volumendisplay, 354
- Volvox-Globator, 178
- Von-Neumann-Sonde, 331
- Voxel, 5, 353

W

- Wahrnehmung, dreidimensionale, 231
Wandmalerei, 43, 77, 80, 81
Webautomat, 335
Wechselbild, 2, 107, 262, 263
Wellenfront, 149
Welt
 monochromatische, 284
 vierdimensionale, XII
 virtuelle, XI, 312, 329, 332
Weltbild
 geozentrisches, 62
 heliozentrisches, 62
Wheel of Life, 177, 178
Wiedergabe, autostereoskopische, 263
Wirkung, stereoskopische, 281
Wunderrad, 157, 175
Wunderscheibe, 163
Würfelquelle, 20, 21

Z

- Zauberlampe, 137
Zauberlaterne, 3, 137, 146, 148, 149, 156
Zauberscheibe, 169
Zeichnung, zweidimensionale, 81
Zentralprojektion, 7, 81, 97, 107
Zoëtrop, 177–179, 183
 binokulares, 178
Zograskop, 257, 258
Zoöpraxiskop, 183
Zoopraxikopie, 180
Zweitafelprojektion, 89
Zyklide, 237
Zyklop, 333
Zylinderlinse, 269, 270, 272