

Boris Bogdan

Med Revolution

Neue
Technologien
am Puls der
Patienten



EBOOK INSIDE



Springer

MedRevolution

Boris Bogdan

MedRevolution

Neue Technologien am
Puls der Patienten



Boris Bogdan
Oberwil, Schweiz

ISBN 978-3-662-57505-5 ISBN 978-3-662-57506-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57506-2>

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 2018
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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Lektorat: Margit Schlomski

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer 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

Für Cécile, die mich täglich mit neuen Ideen inspiriert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Cloud Computing – Medizin in und über den Wolken	5
2.1	Cloud Computing und Trends im Gesundheitswesen	9
2.2	Anwendungsmöglichkeiten und Nutzen im Gesundheitswesen	14
2.3	Herausforderungen	21
2.4	Ein kurzer Ausblick in die Zukunft	24
	Quellen und Literatur	25
3	Künstliche Intelligenz in der Medizin	29
3.1	Die Anfänge	29
3.2	Was ist künstliche Intelligenz?	32
3.3	Goldrauschstimmung	37

VIII Inhaltsverzeichnis

3.4	Anwendungen im Gesundheitswesen	40
3.5	Potenzial für neue Berufe und Geschäftsmodelle	49
3.6	Demokratisierung der Gesundheitsversorgung	51
3.7	Ausblick	53
	Quellen und Literatur	58
4	Internet of Things (IoT) im Gesundheitswesen	63
4.1	Was ist das Internet der Dinge eigentlich?	64
4.2	Das Schichtenmodell als Grundlage des IoT	66
4.3	Vernetzte Gesundheit und Gesundheitswesen	69
4.4	IoT für Effizienz und Qualität im klinischen Umfeld	70
4.5	IoT für biometrisches Monitoring	74
4.6	Probleme und Herausforderungen	83
4.7	Ausblick in die Zukunft – völlige Transparenz?	87
	Quellen und Literatur	90
5	Blockchain und der Schutz unserer Privatsphäre	93
5.1	Technologie	93
5.2	Blockchain zum Schutz unserer Patientendaten?	99
5.3	Die Zukunft	105
	Quellen und Literatur	106

6	Virtual und Augmented Reality in der Medizin	109
6.1	VR zur Simulation von Operationen	112
6.2	VR in der Schmerzbehandlung, Neurologie und Psychologie	120
6.3	AR und der smartere Arzt	127
6.4	Der virtuelle Mensch	129
	Quellen und Literatur	131
7	Die Roboter kommen	137
7.1	Roboter operieren	137
7.2	Roboter in der Pflege und Altersbetreuung	149
7.3	Superhumans und Roboter in der Rehabilitation	152
7.4	Was bringt die Zukunft?	156
	Quellen und Literatur	159
8	3D-Drucken – wir designen uns selbst	161
8.1	Technologie	163
8.2	Meilensteine	165
8.3	Anwendungsmöglichkeiten	168
8.4	Aktuelle Forschungen und Entwicklungen	172
8.5	4D-Drucken	175
8.6	Beschränkungen und Zukunftsfragen	177
8.7	Ausblick	180
	Quellen und Literatur	181

X Inhaltsverzeichnis

9	Behandlung aus der Ferne: Telemedizin	185
9.1	Eine lange Tradition	187
9.2	Hürden und Skepsis	191
9.3	Es braucht mehr als gute Ideen	196
9.4	Die Telemedizin der Zukunft	202
	Quellen und Literatur	205
10	Zwischen Fiktion, Wissenschaft und Wirtschaft: Nanomedizin	209
10.1	Nanotechnologie in der Medizin	210
10.2	Nanotaxi, bitte!	216
10.3	Die Tumor-Kocher	220
10.4	Die Suche nach der magischen Kugel	222
10.5	Nanobots gehen auf Patrouille	224
	Quellen und Literatur	226
11	Precision Medicine und das Versprechen von Omics	231
11.1	Rückblick	233
11.2	Precision Medicine heute	235
11.3	Technologie als Treiber von Precision Medicine	238
11.4	CRISPR – wir korrigieren unsere Gene	251
11.5	Hilfe vom Immunsystem	254
11.6	Wie sollen wir die Precision Medicine bezahlen?	260
11.7	Precision Medicine in der Praxis	262
11.8	Kritische Stimmen	268
11.9	Precision Medicine von Morgen	270
	Quellen und Literatur	271

12	Technologieübergreifende Herausforderungen und Fragestellungen	277
12.1	Ethische Fragen	278
12.2	Cybersecurity – Sicherheitsfragen	283
12.3	Der gläserne Patient – Fragen zum Datenschutz	292
12.4	Cyborgs – Die besseren Menschen?	296
12.5	Ein langer Weg liegt vor uns	297
	Quellen und Literatur	302



1

Einleitung

Lange schien es, also ob das Gesundheitswesen nicht von der neuen technologischen Revolution erfasst würde. Wer in eine Klinik musste, hat bisher davon kaum was mitbekommen. Natürlich sind die Geräte neuer und leistungsfähiger. Aber viele Ärzte haben immer noch einen Pager, brauchen Fax und arbeiten genauso wie vor zehn Jahren. Doch es scheint, also ob vieles davon bald der Vergangenheit angehört. Schauen wir uns andere Industriezweige an, so habe die Technologien bereits so manches auf den Kopf gestellt. In der Produktion ist es immer häufiger der Roboter. Im Investieren die künstliche Intelligenz. Und im Alltag ist die neue Technologie auch bereits Realität. Unsere Daten sind in der Cloud. Doch was bedeuten alle diese Technologien eigentlich? Was werden sie im Gesundheitswesen bewirken?

Aktuell werden wir in den Medien tagtäglich mit der Diskussion um diese neuen Technologien konfrontiert. Doch was genau dahinter steht, bleibt meist nur knapp erklärt. Und bei der Fülle an Begriffen, Fachwörtern und Technologien ist es schwierig, einen Überblick zu behalten.

Unsere Welt heute unterscheidet sich grundsätzlich von der vor 20 Jahren. Das Internet steckte in seinen Anfängen. Das iPhone kam erst in knapp zehn Jahren auf den Markt. Das mobile Internet war noch unglaublich langsam und das führende Mobiltelefon im Markt war das Nokia 6120.

Heute beherrscht das iPhone den Markt. Nokia hat sein Mobilfunksparte abgestoßen. Das mobile Internet mit 4G ist schneller als alles was, wir vor 20 Jahren im Festnetz gewohnt waren.

Dieselbe Betrachtung werden wir in 20 Jahren wieder machen. Wir stehen erneut am Anfang einer neuen Revolution. Diesmal nicht ausgelöst durch das Internet oder das Smartphone. Die neuen Technologien sind Cloud Computing, künstliche Intelligenz, Internet der Dinge, Blockchain oder 3D-Druck.

Dieses Buch ist der Versuch, aus der Sicht des Patienten und Konsumenten einen Einblick zu geben, wie diese und weitere Technologien die Zukunft des Gesundheitswesens gestalten werden. Dabei möchte ich vor allem Technologien aufgreifen, die bereits in anderen Gebieten existieren und jetzt allmählich in die Medizin übernommen werden. Wir werden sehen, wo die Forschung heute steht und wo die Reise womöglich hingeht. Dabei habe ich versucht zu vermeiden, in allzu tiefe technische Diskussionen

abzuschweifen. Vor allem auch darum, weil ich selbst ursprünglich Arzt und nicht Ingenieur oder Programmierer bin. Die Anforderung an das Buch ist, dem Leser einen gut verständlichen Überblick zu geben und dabei kritisches Denken anzuregen. Nicht alles, was kommt, ist unbedenklich.

An einigen Stellen werden Sie sicher denken, dass die Ideen eher Science-Fiction als nahe Zukunft sind. Das ist okay, da ich nicht den Anspruch habe, recht zu haben. Lieber möchte ich an der einen oder anderen Stelle ein wenig mehr Fantasie haben, als von der Entwicklung überrascht zu werden.

Für mich steht auf jeden Fall fest: Das Gesundheitswesen 2.0 wird eine bessere Medizin ermöglichen. Ob uns dabei alles gefallen wird, möchte ich bezweifeln. Aber solange wir und die Forscher und Unternehmen in erster Linie an eine bessere Erhaltung der Gesundheit oder Behandlung der Krankheit denken, sind wir auf dem richtigen Weg. Kritisch wird es, wenn wir uns ausmalen, welchen Schaden all die gesammelten Daten in den falschen Händen anrichten können. Vielleicht werden wir deshalb auch im Interesse unserer Privatsphäre teilweise dem Fortschritt im Wege stehen. Das letzte Kapitel wird sich mit dieser und anderen ethischen Fragestellungen auseinandersetzen.

Im Hauptteil des Buches stelle ich jeweils eine Technologie pro Kapitel vor. Zum Teil bauen diese aufeinander auf, z. B. ist die Robotik stark von der künstlichen Intelligenz (KI) abhängig.

Wie wichtig diese und andere Technologien in unserem Gesundheitswesen sein werden, können wir nur erahnen. Die Tatsache, dass Apple, Amazon und Google

mittlerweile selbst auf dem Gebiet der Gesundheit aktiv sind, lässt erahnen, dass wir in Zukunft ein anderes Umfeld erwarten werden. Nicht nur die bekannten Technologiefirmen betreten das Feld. Auch unzählige Start-up-Unternehmen schießen wie Pilze aus dem Boden. Doch diesmal sind es nicht Biotechnologiefirmen. Es sind Firmen, spezialisiert auf z. B. künstliche Intelligenz oder Blockchain. Mit ihnen kommt auch vollkommen neues Talent auf die Bühne. Mathematiker, Physiker, Jungunternehmer. Sie alle werden das traditionelle Denken und die starren Strukturen des heutigen Gesundheitssystems infrage stellen. Viele werden daran scheitern. Doch andere werden erfolgreich sein und die Industrie auf den Kopf stellen. Wir haben es an anderen Orten gesehen. Die Medizin wird keine Ausnahme sein.

Am Ende des Buches sollte jeder Leser ein besseres Verständnis davon haben, was auf uns zukommt und idealerweise auch eine Meinung dazu, wie wir damit umgehen wollen. Denn wir sollten es nicht dem Zufall überlassen, wo die Reise hingeht, sondern versuchen, diese mitzustalten. Die Gesundheit ist schließlich unser höchstes Gut.



2

Cloud Computing – Medizin in und über den Wolken

Als im Sommer 2017 das wichtigste Radrennen der Welt, die Tour de France, durch Frankreich raste, konnten Fachleute, Journalisten, Fans und Interessierte dem dopinggeplagten Spektakel über eine eigene Online-Plattform eine Fülle von Detailinformationen, Auswertungen, grafischer Darstellungen und unterschiedlichster Renndaten abrufen. Alle diese Informationen und Zusatzangebote waren erst durch eine cloudbasierte Umgebung der ganzen Welt zugänglich.

Die Amaury Sports Organisation (ASO), der Veranstalter der Tour de France, und Dimension Data, ein globaler IT-Dienstleister, versprachen ein einzigartiges Fan-Erlebnis mit Echtzeitdaten und Statistiken – und zwar über die gesamte 21-tägige Tour hinweg.

Das Informationsangebot der Tour de France-Macher ist ein Musterbeispiel dafür, wie vielfältig und leistungsfähig Cloud Computing sein kann. Es können gigantische Datenmengen verarbeitet, ausgewertet und aufbereitet werden. Und in einer Cloud können nahezu beliebige Anwendungen mit flexiblen Kommunikationsmöglichkeiten ausgeführt werden.

Doch was genau verstehen wir unter Cloud Computing? Im weitesten Sinne verstehen wir darunter, dass unsere Software und Hardware anstatt auf unserem Schreibtisch oder in unserem Firmennetzwerk stationiert zu sein, von einem anderen Unternehmen bereitgestellt wird (Woodford 2017). Im Detail kann das unterschiedlich definiert werden. Die einen verstehen unter Cloud Computing Software- respektive Hardware-Dienstleistungen übers Internet, die anderen IT-Outsourcing an Dritte. Wie auch immer die Definition lautet, gemeinsam ist, dass wir übers Internet auf die Software respektive Infrastruktur zurückgreifen.

Wie die IDG Enterprise Cloud Computing Survey 2016 zeigt, nutzen bereits 70 % der amerikanischen Unternehmen mindestens eine Applikation in der Cloud¹. Die Umfrage zeigt auch, dass Sicherheitsbedenken nach wie vor das größte Hindernis darstellen.

Cloud-Technologien leisten schon heute vielerorts einen signifikanten Beitrag zur IT und der digitalen

¹IDG Communications: Tech Research. 2016 IDG Cloud Computing Survey (2016) *Tools for Marketers*. <https://www.idg.com/tools-for-marketers/2016-idg-enterprise-cloud-computing-survey/>. Zugriffen: 8. Januar 2018.

Datenverarbeitung in Unternehmen. Die klassischen Cloud-Services wie IaaS (Infrastructure as a Service), PaaS (Plattform as a Service) und SaaS (Software as a Service) werden immer mehr durch neue Cloud-Modelle, darunter Storage-as-a-Service, Disaster Recovery-as-a-Service und Database-as-a-Service, erweitert. Diese Outsourcing-Angebote sind auf die Speicherung von Daten, die Wiederherstellung von IT-Systemen in Notfällen und die Bereitstellung von Datenbanken spezialisiert.

Die Cloud Services können über drei verschiedene Set-ups erfolgen. Die *Private Cloud*, die *Public Cloud*, die *Hybrid Cloud* und die *Community Cloud*².

In der *Private Cloud* behält ein Unternehmen z. B. aus Datenschutzgründen die IT-Dienste intern und stellt Services *cloud-artig* seinen Mitarbeitern zur Verfügung. Die *Public Cloud* ist öffentlich zugänglich, d. h. die Dienste werden offen über das Internet angeboten (z. B. Google Docs). Mit der *Hybrid Cloud* behalten Unternehmen einen Teil der IT-Dienste intern und lagern einen Teil aus. *Community Clouds* sind Clouds, die z. B. von mehreren Unternehmen gemeinsam genutzt werden, z. B. im Rahmen eines Projektes, sonst aber nicht öffentlich zugänglich sind.

²Fraunhofer-Allianz Cloud Computing: Was bedeutet Public, Private, Hybrid Cloud? <http://www.cloud.fraunhofer.de/de/faq/publicprivatehybrid.html>. Zugegriffen: 9. Januar 2018.

Vor- und Nachteile des Cloud Computing

Was genau macht Cloud Computing so attraktiv für Unternehmen?

- *Zuverlässigkeit:* Cloud Computing ist die zuverlässigste Form der IT- Infrastruktur. Häufig wird eine Betriebsbereitschaft von 99,9 % über 365 Tage/24 h garantiert.
- *Kosten:* Cloud Computing verlangt keine großen Anschaffungskosten oder Investitionen. Häufig wird so viel bezahlt wie genutzt wird – ähnlich wie beim Strom. Über einen längeren Zeitraum hinweg kann es trotzdem mehr kosten, als In-House-Systeme. Doch diese Zahlen wären nur bei gleicher Zuverlässigkeit vergleichbar.
- *Kapazität:* Cloud Computing stellt immense Speicher- und Rechenkapazität zur Verfügung. Mit den Datensätzen von heute wäre dies innerhalb eines Unternehmens kaum machbar.

Doch es gibt natürlich auch Nachteile:

- *Sicherheit:* Es ist natürlich für Hacker viel attraktiver ein großes Cloud-Service-Unternehmen zu hacken, als irgendein mittelständiges Unternehmen. In der Regel verfügen diese Service-Unternehmen über die höchsten Sicherheitsstandards – trotzdem bleibt ein Restrisiko.
- *Kontrolle:* Abonnenten von Cloud Services haben keine Kontrolle über die Software oder Hardware. Solange alles gut läuft, spielt dies kaum eine Rolle. Im Falle, dass sich dies ändert, kann diese Abhängigkeit zur Last werden.
- *Datenschutz und persönliche Daten:* In Europa besonders kann es zu komplexen Anforderungen kommen, wo

persönliche Daten gespeichert werden dürfen oder sollen, je nach Gesetzgebung. So kann es sein, dass Kliniken aus Deutschland nicht wollen, dass Patientendaten auf einem Server in den USA gespeichert werden.

Trotz der obigen Bedenken wird der größte Teil der IT-Infrastruktur und Dienstleistungen über kurz oder lang in die Cloud migrieren.

2.1 Cloud Computing und Trends im Gesundheitswesen

Der hohe Wettbewerbs- und Kostendruck, die rasante Entwicklung der IT-Nutzung und die steigenden Anforderungen der Patienten zwingen Krankenhäuser und medizinische Einrichtungen, Einspar- und Optimierungspotenziale auszuloten und auszuschöpfen. Hierbei wird allgemein der Auslagerung von IT-Funktionen ein besonders hohes Einsparpotenzial attestiert.

Tendenziell haben IT-nahe Unternehmen eine hohe Affinität zu innovativen Technikdienstleistungen. Aber auch in der Gesundheitsbranche findet allmählich ein Umdenken statt und man öffnet sich für Outsourcing- und Cloud-Services. Spezielle Dienstleister stellen dabei ihren Kunden die benötigten Infrastrukturen, bei Bedarf auch die gewünschten Applikationen zur Verfügung. Die Nutzung erfolgt dabei auf Basis eines Mietzinses. Art und Umfang der Dienstleistung sowie Fragen der Sicherheit, Verfügbarkeit und Dauer werden in speziellen Verträgen geregelt.

Unternehmen der Gesundheitsbranche profitieren gleich mehrfach von der Nutzung solcher Angebote. In erster Linie entlasten sich Unternehmen von komplexen Aufgaben, die nicht zu ihren Kernkompetenzen gehören. Für den Einsatz von Cloud-Technologien sprechen eine Vielzahl weiterer Punkte. Als einer der wichtigsten Vorteile gilt die Möglichkeit zur Speicherung großer Datenmengen. Insbesondere MRT-Daten beanspruchen erhebliche Speicherressourcen. Durch die zentrale Datenspeicherung vereinfacht sich die Zusammenarbeit über Experten- und Abteilungsgrenzen hinweg. Cloud-Umgebungen stellen üblicherweise auch Kommunikationsplattformen bereit, die alle kollaborativen Aufgaben vereinfachen – auch über beliebige Entfernung hinweg. Davon kann insbesondere die Notfallhilfe profitieren, weil schnellere und zuverlässigere Diagnosen und Behandlungen möglich werden.

Die zentrale Datenspeicherung bringt gleich mehrere Vorteile. So ist in Hochleistungsrechenzentren eine schnelle Analyse möglich, bei Bedarf auch in Echtzeit. Damit vereinfacht sich die Auswertung und klinische Studien sowie Forschungsvorhaben werden mit einer besseren Datenbasis unterstützt. Von der zentralen Speicherung profitieren auch die Telematik und die Telemedizin.

Einer IHS-Studie zufolge, die für die Association of American Medical Colleges erstellt wurde, wird der Bedarf an IT-Ressourcen im Zeitraum von 2014 bis 2025 um 11 bis 17 % steigen – und zwar jährlich (Dall et al. 2016). Diesen drastischen Anstieg wird man nur mit einer entsprechende Aufstockung der verfügbaren Ressourcen begegnen können. Das Cloud Standards Customer Council macht verschiedene Treiber im Gesundheitswesen aus

(Barton et al. 2017), welche maßgeblich mit Cloud Computing verbunden sind:

- *Konsumenten als Entscheidungsträger:* Konsumenten werden in allen Industrien wichtiger. So auch im Gesundheitswesen. Sie wissen mehr und wollen ihre eigenen Entscheidungen treffen. Damit diese möglich ist, brauchen sie einfachen Zugang zu Systemen und Daten, die miteinander verbunden sind. Das heißt, Daten vom Hausarzt sollten idealerweise auch dem Klinikum zugänglich sein, am besten auch, wenn man im Urlaub ist. Das wird nur über Cloud Computing möglich sein.
- *Digitalisierung des Gesundheitswesens:* In den USA mehr als in Europa, werden alte Informationssysteme durch neue ersetzt. Diese sollen in Zukunft ermöglichen (echtzeit-)datengestützte Entscheidungen zu treffen, über Disziplinen hinweg. Daten sollen in der Cloud harmonisiert bzw. standardisiert allen Akteuren bereitstehen. Darüber hinaus wird Cloud Computing ermöglichen, Daten aus anderen Bereichen (Apple Watch, Fitnesstracker, digitale Blutdruckmessgeräte, Glukose-Messgeräte) mit den Daten aus dem Krankenhaus oder der Arztpraxis zu verbinden.
- Andere Treiber, die das Cloud Computing im Gesundheitswesen verankern werden, sind regulatorische Änderungen und Anforderungen im Gesundheitswesen, steigende Gesundheitskosten, der Einfluss der Digitalisierung und die zunehmende Fokussierung auf präventive Maßnahmen.

Aus diesen Trends leiten sich unmittelbar die notwendigen Maßnahmen für ein modernes, zukunftsgerichtetes Gesundheitswesen ab: Die traditionellen Gesundheitsmechanismen müssen um digitale Optionen ergänzt werden, was zwangsläufig steigende Investitionen in Technologien notwendig macht, die die Digitalisierung der Gesundheitswirtschaft beschleunigen. Traditionell ist es vielen Gesundheitsinstitutionen in Europa nicht möglich, riesige Investments in IT-Infrastruktur zu tätigen. Deshalb macht Cloud Computing häufig als Alternative mehr Sinn.

Auch die Rolle der etablierten Akteure des Gesundheitswesens verlagert sich. Es werden neue Geschäftsmodelle benötigt, die niedrigere Kosten, bessere Effizienz und höhere Effektivität erlauben. Das Cloud Standards Customer Council und ClearData³, ein Spezialist für Cloud Services im Gesundheitsbereich, haben jeweils eigene Leitfäden entwickelt, wie man diese Technologie effektiv und zielgerichtet in verschiedenen Bereichen des Gesundheitswesens einsetzen kann.

Große Player und große Herausforderungen

Die Großen der Cloud Computing-Branche, alle voran Amazon, Google, IBM, Microsoft, Oracle und SAP, publizieren auf ihren Websites teilweise Success Storys erfolgreicher Cloud-Implementierungen. Microsoft veröffentlicht

³Clear Data: Best Practices in Healthcare Cloud Computing. <https://www.cleardata.com/whitepapers/best-practices-healthcare-cloud-computing/>. Zugriffen: 8. Januar 2018.

Erfolgsgeschichten, die insbesondere den wirtschaftlichen Gewinn fokussieren auf der Seite *Cloud profitability success stories*. IBM führt auf seiner Website über 500 Fallstudien zum Thema Cloud Computing auf. Auch CISCO publiziert eine Fülle von Fallstudien, die man gezielt auf den Bereich Gesundheitswesen (Stichwort Healthcare) einschränken kann. Amazon kommt nach eigenen Angaben auf mehr als eine Millionen Kunden, darunter so namhafte Unternehmen wie Airbnb, General Electric und Kellogg. Doch welche Kunden aus der Gesundheitsbranche kommen und welche spezifischen Angebote verfügbar sind, verrät man selten. Einen Schritt weiter geht Salesforce, die mit ihrer Health Cloud gezielt Kunden aus dem Gesundheitswesen adressieren.

Noch sind die Fallstudien zum Einsatz der Cloud-Technologie im Gesundheitswesen seltener als in anderen Industrien. Die Gründe hierfür dürften verschiedener Natur sein. Naheliegend ist, dass die sensiblen Patientendaten das größte Hindernis darstellen, da niemand will, dass derartige Informationen publik werden.

Welche Relevanz das Cloud Computing hat und welches kommerzielle Potenzial es für bekannte und weniger bekannte Player hat, belegt die Veröffentlichung von Microsofts Denkschrift zum Cloud Computing in 2017. Brad Smith, der Chef-Justiziar von Microsoft, schwärmte bei der Vorstellung der Schrift (Reiche 2017): „Cloud Computing bietet die Antwort auf einige der größten Herausforderungen in der Welt.“ Alleine in Europa habe Microsoft drei Milliarden US-Dollar in den Aus- und Aufbau einer hochleistungsfähigen Cloud-Infrastruktur investiert, so Microsoft-Chef Satya Nadella. Für Microsoft ist Cloud

Computing ein wichtiges Fundament der digitalen Transformation. Vonseiten der Wirtschaft und Politik erfährt man dabei gewichtige Unterstützung. Sicherheitsbedenken versucht man, mit stringenten Vorkehrungen zu entkräften.

2.2 Anwendungsmöglichkeiten und Nutzen im Gesundheitswesen

Prinzipiell bietet das Cloud Computing eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten. Man kann diese grob in folgende Gruppen unterteilen:

- Cloudbasierte Patientendaten und telemedizinische Dienste,
- Verarbeitung, Austausch und Archivierung von medizinischen Bildern,
- Public Health (Gesundheitsmanagement der Bevölkerung),
- klinische Informationssysteme (HIS),
- medizinische Forschung und Diagnostik.

Ich beschreibe hier nur einen Teil der möglichen Anwendungen (Barton et al. 2017; Griebel et al. 2015). Sicherlich wird Cloud Computing in den nächsten Jahren noch viele weitere spannende Anwendungen im Gesundheitswesen finden. Festzuhalten ist, dass Cloud Computing eine Technologie ist, welche spezifische Anwendungen ermöglicht. Deshalb werden auch verschiedene Themen, die ich hier vorstelle, im Folgenden als eigenes Kapitel erscheinen.

Cloudbasierte Patientendaten und telemedizinische Dienste

In Japan wird bereits seit 2013 mit der sogenannten Cloud Cardiology die kardiologische Notfallversorgung verbessert (Fujita et al. 2013). In Tokio wurde dazu ein kostengünstiges mobiles Elektrokardiografie-System für die Präventivdiagnose entwickelt, das über eine integrierte EKG-Einheit Daten per Bluetooth und Android Smartphone an das Cloud-System übermittelt. Dank des Cloud-Servers können die EKG-Daten der Patienten rund um die Uhr ausgewertet und überwacht werden – und zwar sowohl innerhalb als auch außerhalb des Krankenhauses. Generell ist ein Trend zur Nutzung von Smartphone-Daten erkennbar, die von spezifischen Tracking-Geräten an ein Cloud-System übermittelt werden.

Welche Effekte die Verwendung von Cloud Computing haben kann, zeigt das Beispiel Taiwan (Lian 2017). Seit 1995 verfügt Taiwan über ein landesweites Krankenversicherungssystem. 2013 wurde das System grundlegend reformiert und mithilfe von zusätzlichen Versicherungsbeiträgen wurden PACS (Bildarchivierungs- und Kommunikationssysteme), HIS (Krankenhausinformationssysteme) und RIS (Radiologie Informationssysteme) angeschafft. Die IT-Lösungen werden überwiegend cloudbasiert betrieben. Wie eine aufwendige Studie zeigt, profitieren alle Akteure von der Nutzung der Cloud-Technologie, denn diese erfüllt ihren Wertschöpfungszweck.

Ein weiteres Land, welches diesen Weg eingeschlagen hat, ist Estland⁴. Es digitalisiert nicht nur das Gesundheitswesen, sondern alle Aspekte der Verwaltung (e-government, e-prescription, e-healthcare etc.). Das Magazin Wired hat die estnische Gesellschaft sogar als am die am stärksten digitalisierte weltweit gefeiert. Alle Gesundheitsdaten sind in der Cloud und jederzeit zugänglich. Damit werden unnötige Behandlungen vermindert und Informationslücken entlang des Behandlungspfads geschlossen. Vorbildlich.

Weiter gibt es bereits unzählige Anbieter, die elektronische Krankenakten in der Cloud anbieten. Das ist vor allem für Praxen spannend, da das System skalierbar ist, sie kein Know-how aufbauen müssen und die Ärzte auch außerhalb der Praxen auf die Daten zugreifen können.

Großes Potenzial der Technik wird insbesondere bei der Versorgung von ländlichen Regionen gesehen. In Indien leben etwa 70 % der Bevölkerung in Dörfern, von denen viele nur einen begrenzten Zugang zu Gesundheitsdienstleistungen haben. Dieser Umstand bewegte Gesundheitsspezialisten zum Aufbau einer Gesundheits-Cloud, in der über 8000 Mediziner, Fachleute etc. auf Gesundheitsdaten von Patienten zugreifen können (D'Cunha 2016). Innerhalb dieser Cloud-Umgebung vernetzt das ReMeDi-Programm (Remote Medical Diagnostics) Ärzte, Kliniken, Apotheken und Pflege. Damit soll insbesondere auch in

⁴E-Estonia: We Have Built a Digital Society and so Can You, *E-Estonia*. <https://e-estonia.com>. Zugegriffen: 8. Januar 2018.

ländlichen Regionen eine medizinische Basisversorgung implementiert werden.

In der wenig besiedelten Region ist aufgrund der großen Bevölkerungsstreuung und erheblicher Entfernung der Zugang zu Gesundheits- und medizinischen Dienstleistungen zum Teil sehr schwierig. Die Essar-Stiftung hat sich dieser Problematik angenommen und eine einzigartige Gesundheitsinitiative ins Leben gerufen, die Modellcharakter hat. Das Ziel der Initiative ist es, der überwiegend armen Bevölkerung den Zugang zur ansonsten teuren, unzugänglichen Behandlung zu ermöglichen. Gleichzeitig nimmt sie den Druck von überlasteten Krankenhäusern in der Region. Mit der Unterstützung der Bezirksverwaltung und des Gesundheitsamtes hat die Essar-Stiftung diese Plattform implementiert. Das System verbindet Patienten mit zertifizierten Ärzten via HD-Videokonferenzen und mobilen Anwendungen. Es bietet auch die Möglichkeit, vorbeugende Gesundheits-Screenings durchzuführen.

Durch die cloudbasierte Telemedizin wird die Behandlung intelligenter. Die Patienten nutzen dabei freistehende Gesundheits-Terminals und können mit dem Mediziner in einer Echtzeitkonferenz ein persönliches Gespräch führen. Diese Art von frei zugänglichen Gesundheitsautomaten bietet die Möglichkeit, in wenig besiedelten Regionen eine medizinische Grundversorgung zu realisieren.

Verarbeitung, Austausch und Archivierung von medizinischen Bildern

Picture Archiving and Communication-Systeme (PACS, Bildablage- und Kommunikationssystem) dienen in der

Medizin als Bildarchivierungs- und Kommunikationssystem und finden in Krankenhäusern und Arztpraxen eine signifikante Verbreitung. Sie gehören zu den am häufigsten anzutreffenden Cloud-Angeboten und werden gelegentlich unter der Bezeichnung PACS-as-a-Service angeboten (Chen et al. 2017). Inzwischen existieren verschiedene Anbieter solcher Speziallösungen. GE Healthcare, die zu den renommiertesten Unternehmen und Marktführern in der Kardiologieinformatik gehören, bieten mit GE Health Cloud eine entsprechende Lösung an. Auch das Schweizer Unternehmen Swisscom ist im Bereich der PACS-as-a-Service aktiv. Deren Plattform erlaubt die Ablage von DICOM-Daten oder -Worklists in der Cloud. Der Zugriff erfolgt webbasiert, wobei das Rechenzentrum in der Schweiz betrieben wird⁵.

Mithilfe von Cloud Computing-Techniken lassen sich außerdem aufwendige Operationen optimal vorbereiten. Die digitale Radiografie dient bereits seit einigen Jahren der präoperativen Planung. Wie Maratt et al. zeigen, lässt sich durch den Einsatz eines cloudbasierten digitalen Templating-Systems die Genauigkeit und Effizienz deutlich steigern (Maratt et al. 2012). Dazu wurde im Rahmen einer Studie die Integration von Cloud-Diensten untersucht. Das Ergebnis der Wissenschaftler spricht eine deutliche Sprache: Die Verbesserungen sind beträchtlich. Allerdings weist die Studie auf einen Knackpunkt der Cloud-Technik hin: Für spezielle medizinische Anwendungen sind regulatorische Änderungen notwendig.

⁵Swisscom: Swisscom E-Health. <https://www.swisscom.ch/en/business/enterprise/offer/e-health.html>.

Public Health (Gesundheitsmanagement der Bevölkerung)

Mittels der großen Datensätze ganzer Bevölkerungsteile in der Cloud können nun Krankheiten verfolgt werden, örtlich und zeitlich eingegrenzt und entsprechende Maßnahmen getroffen werden. Das Center for Disease Control (CDC) in den USA stellt verschiedene Tools hierfür zur Verfügung, wie z. B. das Epi Info™ Cloud Data Analytics⁶. Andere Unternehmen wie IBM oder Google sind hier ebenfalls aktiv.

Klinische Informationssysteme (HIS)

Systeme für die administrativen Aufgaben in der Klinik (z. B. im Bereich der Medizin, Verwaltung, Finanzen, Recht). Diese werden häufig in weitere Sub-Fachsysteme aufgeteilt: Laboratory Information System (LIS), Radiology Information System (RIS) oder Picture Archiving and Communication System (PACS).

Die Aufgabe dieser Systeme ist unter anderem, einen kompletten Datensatz für jeden Patienten der Klinik zu aggregieren und sicher zu speichern. Dies soll dem Gesundheitspersonal ermöglichen, jederzeit die Daten abzurufen, um den Patienten optimal betreuen zu können.

Medizinische Forschung und Diagnostik

Wie vielfältig die Anwendungsbereiche von Cloud Computing im Gesundheitswesen sind, zeigt das Beispiel Icahn

⁶Epi Info™: Epi Info™ for Web und Cloud (2017) *Centers for Disease Control and Prevention*. <https://www.cdc.gov/epiinfo/cloud.html>. Zugegriffen: 8. Januar 2018.

School of Medicine am Mount Sinai. Ein Forschungsschwerpunkt der Hochschule in New York City im Bereich Humanmedizin und Biologie sind Forschungen zu Mamma- und Ovarialkarzinom. Dr. John A. Martignetti, Dr. Peter R. Dottino und ihre Kollegen von Station X suchen in über 2000 vom The Cancer Genome Atlas Consortium (TCGA) generierten DNS-Sequenzen zu Karzinomen und deren Keimbahnen nach neuen Erkenntnissen. Zur Analyse der mehr als 100 TB Daten ist eine gewaltige Computerleistung erforderlich. Konkret nutzt man Amazon Web Services (AWS) als Basis für die Genetik-Plattform GenePool. Dank der dynamischen Skalierung sind die Forscher in der Lage, Tausende von Genomen innerhalb von wenigen Minuten zu analysieren.

Der sogenannte OMICS-Bereich, der sich mit der Genomik (Analyse unseres Erbgutes [DNS]), Proteomik (Erforschung der Eiweiße in unserem Körper) und der Molekularmedizin generieren unvorstellbar große Datensätze. Das Analysieren dieser Daten wird häufig nur mittels Cloud Computing ermöglicht, vor allem falls der Anspruch besteht, über Institutionen hinweg gemeinsam an den Daten zu arbeiten oder wie im obigen Beispiel vergleichbare Datensätze zu suchen (Griebel et al. 2015). Wie wir im Kapitel Precision Medicine (Kap. 11) sehen werden, liegt hierin ein Grundpfeiler der zukünftigen Medizin: das Analysieren der Gene und Proteine und bei auffälligen Veränderungen (Mutationen) vergleichbare Patienten, die erfolgreich behandelt worden sind, zu suchen und daraus eine individuelle Therapie zusammenzustellen.

2.3 Herausforderungen

Auf den ersten Blick erscheinen die Vorzüge der Cloud-Technologie sehr verlockend. Krankenhäuser und Arztpraxen können die teure und ungeliebte IT auslagern und sich auf das konzentrieren, wofür sie ausgebildet wurden. Doch bei näherer Betrachtung ergeben sich beträchtliche Probleme, für die keine einfachen Lösungen existieren. Prinzipiell ist die Auslagerung von kritischen Informationen und Dienstleistungen an Drittanbieter immer mit Sicherheitsrisiken verbunden. Im Gesundheitswesen müssen insbesondere wegen des Patientengeheimnisses und des Datenschutzes mögliche Zugriffe auf Gesundheitsdaten in der Cloud gezielt beschränkt werden. In den USA hat das National Institute of Standards and Technology deswegen für diesen Anwendungsbereich die *NIST Cloud Computing Reference Architecture* entwickelt, die als Referenz für den Aufbau und den Betrieb einer cloudbasierten Umgebung dient (Hogan und Sokol 2013).

Verschiedene Anwendungsbereiche von Cloud-Technologien im Gesundheitswesen wurden bereits genannt. Aus diesen unterschiedlichen Möglichkeiten ergeben sich verschiedene Herausforderungen, die insbesondere die Aspekte Management, Technologie, Sicherheit und rechtliche Fragen betreffen. Die bekannten Anbieter von Cloud-Services versprechen ihren Kunden schon seit einigen Jahren die Öffnung ihrer Plattformen für die Ausführung medizinischer Applikationen. Hierfür benötigt man aber je nach Geografie und Anwendung zusätzliche Zertifizierungen, wie z. B. HIPPA (Health Insurance

Portability and Accountability Act of 1996) in den USA. Viele kleinere Unternehmen speichern jedoch auch heute noch sensitive Daten ohne diese Richtlinien zu beachten (Gately 2017). In Europa wird 2018 eine erneuerte Regelung in Kraft treten, welche den Datenschutz betrifft. Nichtbefolgen wird dann mit sehr schmerzlichen Bußgeldern bestraft werden.

Trotz der Sicherheitsbedenken zeigen neuere Forschungen, dass Cloud Computing für mehr als drei Viertel aller CEO ein zentrales Thema für die nahe Zukunft ist. CISCO schätzt, dass der cloudbasierte Datenverkehr in den nächsten Jahren mit 33 % wachsen wird und 2019 ein Volumen von 8,6 ZB erreichen soll (860 Mrd. TB). Zum Vergleich, eine Bibel hat ca. 0.000.043 TB.

Weitgehende Einigkeit besteht unter Experten, dass auch das Gesundheitswesen von dieser Technik entscheidend profitieren wird (Rosenthal et al. 2010). Damit die Cloud die gewünschten Vorteile und Funktionalitäten bietet, müssen die Anforderungen an die Dienstleistung eng zwischen Anwender und Anbieter von Cloud Services abgestimmt werden. Komplexe Szenarien, die beispielsweise durch Mischformen – Stichwort Hybrid-Cloud – gekennzeichnet sind, machen die Sache nicht einfacher.

Die größten Bedenken sind üblicherweise technischer Natur: Sind die Daten in der Cloud sicher und wie schützt man sie vor unberechtigten Zugriffen? In der Praxis ergeben sich eine Fülle weiterer Herausforderungen. Hier ist zu klären, wie ein länderübergreifender Zugriff möglich ist, wie gesetzliche Vorgaben der Datensicherheit bzw. des Datenschutzes eingehalten werden. Wie kann man die Umgebung von Hacker-Attacken von innen

und außen schützen? Eine nicht unerhebliche technische Herausforderung stellen die Datenmigration und die Verwendung bestehender Daten in der Cloud dar. Eine Eins-zu-Eins-Verschiebung von medizinischen Anwendungen von einem lokalen Rechenzentrum in einer Cloud ist nicht ohne Weiteres möglich. Schließlich müssen auch betriebswirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Es ist zu klären, welche Kosten- und Nutzenvorteile sich konkret ergeben.

Patentrezepte für derlei komplexe Fragestellungen existieren nicht – und können auch nicht existieren, denn die Anwendungsbereiche und Anforderungen sind zu komplex und zu unterschiedlich. Doch daraus ergeben sich beträchtliche Potenziale für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle. Fachleute, die aus dem medizinischen Bereich kommen, sind bestens mit den Abläufen und Notwendigkeiten des Krankenhaus- und Praxisbetriebs vertraut.

Spezialisten sind insbesondere an der Schnittstelle zwischen IT-Dienstleistern und Krankenhäusern, Praxen, Krankenversicherungen und Krankenkassen gefragt, die im Auftrag ihrer Kunden die Vertragsvereinbarungen mit dem Cloud-Anbieter führen, die praktische Implementierung managen und den späteren Betrieb überwachen. Benötigt werden auch Berater, die sich in beiden Welten – also in der Medizin und der IT – sicher bewegen können. An der Schnittstelle zwischen Gesundheitswesen und IT wird über Erfolg und Misserfolg eines Projekts entschieden.

2.4 Ein kurzer Ausblick in die Zukunft

Angesichts der Leistungsfähigkeit, Finanzkraft und der Marktdurchdringung der großen Player des Cloud Computings ist davon auszugehen, dass diese die offenen Fragen lösen werden und insbesondere die notwendige Vertrauenswürdigkeit ihrer Services sicherstellen können. Kunden stehen damit flexible, kollaborative und verbraucherorientierte Lösungen zur Verfügung, die sich positiv auf die Gesundheitsversorgung auswirken werden.

Zukünftige Lösungen werden eine Mehr-Wege-Kommunikation zwischen Gesundheitsdienstleistern und Patienten erlauben und dabei insbesondere Trends wie Mobilgeräte berücksichtigen. Durch Echtzeit-Monitoring werden sowohl Patienten als auch medizinische Fachleute Zugriff auf Gesundheitsdaten und -akten haben und sich so ein ganzheitliches Bild von der Gesundheit des Patienten machen. Diese Informationen können aggregiert und zur Entwicklung neuer Gesundheitskonzepte genutzt werden.

Aber auch Forschung und Entwicklung werden von den gewaltigen Rechnerkapazitäten profitieren und so manches bislang nicht lösbar Problem knicken. Last but not least werden Fachleute und Patienten gleichermaßen davon profitieren, dass sie sich auf die eigentliche Arbeit konzentrieren: die optimale gesundheitliche Versorgung. In Teilen werden Cloud-Engagements auch rückabgewickelt werden, weil sich die erhofften Vorteile nicht eingestellt haben.

Wie wird die ferne Zukunft aussehen? Cloud Computing wird erlauben, zusammen mit dem Internet of Things (IoT), dass alle unsere Daten (zu Gesundheit und Krankheit) jederzeit in *realtime* verfügbar sein werden.

Wir werden die Hoheit über die Daten halten und den Zugang wo nötig und sinnvoll freischalten. Die Daten werden, ohne dass wir wie heute mühsam unsere Fitness-tracker oder Sportuhr synchronisieren müssen, automatisch in die Cloud gehen. KI wird aus dieser riesigen Datenmengen Empfehlungen geben, vor allem darüber, wie wir gesünder und leistungsfähiger sein können. Wir werden verstehen, was geschieht, wenn wir z. B. an einem Samstagabend zu viel Wein beim Essen mit Freunden trinken oder wenn wir zu viel Stress bei der Arbeit haben. So lernen wir, mit Änderungen in unserem Verhalten positiv auf unsere Gesundheit einzuwirken. Wir werden immer häufiger die Möglichkeit haben, Verträge mit „Gesundheitskassen“ abzuschließen, wo wir mit unseren Daten zeigen, dass wir uns um die Gesundheit kümmern und so weniger Beiträge zahlen müssen. Die Transparenz und das Verständnis von Gesundheit und Krankheit wird auf ein anderes Niveau gehoben.

Meine Sorge ist, wenn sich Hacker oder Staaten plötzlich daran machen, die Daten eines großen Cloud-Anbieters zu missbrauchen. Unvorstellbar vor allem dann, wenn auch unsere genetischen Daten dort verfügbar sind.

Quellen und Literatur

Barton, John et al: Impact of Cloud Computing on Healthcare. Version 2.0 (2017) *Clouds Standards Customer Council*. <http://www.cloud-council.org/deliverables/CSCC-Impact-of-Cloud-Computing-on-Healthcare.pdf>. Zugegriffen: 8. Januar 2018

Chen, Yen-Wei, Tanaka, Satoshi, Howlett, Robert J., Jain, Lakhmi C.: Innovation in Medicine and Healthcare 2017: Proceedings of the 5th KES International Conference on Innovation in Medicine and Healthcare (2017) *Smart Innovation, Systems and Technologies, Volume 71*. Springer International Publishing, Heidelberg

Clear Data: Best Practices in Healthcare Cloud Computing. <https://www.cleardata.com/whitepapers/best-practices-healthcare-cloud-computing/>. Zugriffen: 8. Januar 2018

Dall, Tim; West, Terry; Chakrabarti, Ritashree; Iacobucci, Will: The Complexities of Physician Supply and Demand 2016 Update: Projections from 2014 to 2025. Final Report (2016) *IHS Inc.* Prepared for Association of American Medical Colleges. https://www.aamc.org/download/458082/data/2016_complexities_of_supply_and_demand_projections.pdf. Zugriffen: 8. Januar 2018

D'Cunha, Suparna Dutt: India's Most Remote Villages Are Getting Better Healthcare With This Cloud-Based Solution (2016) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/suparnadutt/2016/11/21/indias-most-remote-villages-are-getting-better-healthcare-with-this-cloud-based-solution/>. Zugriffen: 9. Januar 2018

E-Estonia: We Have Built a Digital Society and so Can You, *E-Estonia*. <https://e-estonia.com>. Zugriffen: 8. Januar 2018

Epi Info™: Epi Info™ for Web & Cloud (2017) *Centers for Disease Control and Prevention*. <https://www.cdc.gov/epiinfo/cloud.html>. Zugriffen: 8. Januar 2018

Fraunhofer-Allianz Cloud Computing: Was bedeutet Public, Private, Hybrid Cloud? <http://www.cloud.fraunhofer.de/de/faq/publicprivatehybrid.html>. Zugriffen: 9. Januar 2018

Fujita, Hideo, Uchimura, Yuji, Waki, Kayo, Omae, Koji, Takeuchi, Ichiro, Ohe Kazuhiko: Development and Clinical Study of Mobile 12-Lead Electrocardiography Based on Cloud

Computing for Cardiac Emergency (2013) *Studies in Health Technology and Informatics*, 192, 1077.

Gately, Edward: Most Small Businesses Not Following Cloud Storage Regulations (2017) *Channel Partners*. <http://www.channelpartneronline.com/2017/11/30/most-small-businesses-not-following-cloud-storage-regulations/> Zugegriffen: 9. Januar 2018

Griebel, Lena, Prokosch, Hans-Ulrich, Köpcke, Felix, Toddenroth, Dennis, Christoph, Jan, Leb, Ines et al: A Scoping Review of Cloud Computing in Healthcare (2015) *BMC Medical Informatics and Decision Making* 15, 17. <https://doi.org/10.1186/s12911-015-0145-7>

Hogan, Michael, Sokol, Annie: NIST Cloud Computing Standards Roadmap (2013) *NIST Special Publication 500-291, Version 2*. https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/itl/cloud/NIST_SP-500-291_Version-2_2013_June18_FINAL.pdf. Zugegriffen: 9. Januar 2018

IDG Communications: Teach Research. 2016 IDG Cloud Computing Survey (2016) *Tools for Marketers*. <https://www.idg.com/tools-for-marketers/2016-idg-enterprise-cloud-computing-survey/>. Zugegriffen: 8. Januar 2018

Lian, Jiunn-Woei: Establishing a Cloud Computing Success Model for Hospitals in Taiwan (2017) *Inquiry: A Journal of Medical Care Organization, Provision and Financing*, 54, 46958016685836. <https://doi.org/10.1177/0046958016685836>

Maratt, Joseph D., Srinivasan, Ramesh C., Dahl, William J., Schilling, Peter L., Urquhart, Andrew G.: Cloud-Based Preoperative Planning for Total Hip Arthroplasty. A Study of Accuracy, Efficiency, and Compliance (2012) *Orthopedics*, 35.8, 682–86. <https://doi.org/10.3928/01477447-20120725-05>

Reiche, Lutz: Microsoft will den sicheren Weg in die Cloud weisen. (2017) *Manager Magazin*. <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/it/microsoft-will-den-sicheren-weg-in-die-cloud-weisen-a-1115302.html>. Zugriffen: 9. Januar 2018

Rosenthal, Arnon, Mork, Peter, Li, Maya Hao, Stanford, Jean, Koester, David, Reynolds, Patte: Cloud Computing. A New Business Paradigm for Biomedical Information Sharing (2010) *Journal of Biomedical Informatics*, 43.2, 342–53. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2009.08.014>

Swisscom: Swisscom E-Health. <https://www.swisscom.ch/en/business/enterprise/offer/e-health.html>

Woodford, Chris: Cloud Computing – A Simple Introduction (2017), *Explain That Stuff*. <http://www.explainthatstuff.com/cloud-computing-introduction.html>. Zugriffen: 8. Januar 2018



3

Künstliche Intelligenz in der Medizin

3.1 Die Anfänge

Als Peter Szolovits und eine Schar auserwählter Experten aus den Bereichen Computerwissenschaften und Medizin im Jahre 1982 die erste relevante Publikation zum Einsatz von künstlicher Intelligenz mit dem Titel *Artificial Intelligence in Medicine* veröffentlichten, ahnte noch niemand, welchen Einfluss diese Technik einmal auf die Medizin und das Gesundheitswesen haben würde (Szolovits 1982). Peter Szolovits lehrte seit Ende der 1970er-Jahre als Privatdozent am Institut für Elektrotechnik und Informatik des renommierten Massachusetts Institute of Technology. Als Spezialist für künstliche Intelligenz (KI) mit dem Schwerpunkt medizinische Anwendungen beschäftigte er sich mit grundlegenden Fragen des Einsatzes von KI-Techniken im

Gesundheitswesen. Im Mittelpunkt seiner Forschungsbemühungen stand die computergestützte Hilfe von Medizinern in der Diagnose, der Behandlung und der Pflege von Patienten.

Für Szolovits und seine Kollegen bestand die größte Herausforderung für Mediziner schon damals in der Beherrschung der immer komplexer und umfänglicher werdenden Hochleistungsmedizin. Die Experten prognostizierten, dass Allgemeinmediziner angesichts der neuen Erkenntnisse und Forschungsergebnisse kaum noch in der Lage sein würden, eine optimale Diagnose und Behandlung für den einzelnen Patienten sicherzustellen. Das Problem konnte damals noch nicht mit künstlicher Intelligenz gelöst werden und ist auch heute noch eine der spannendsten Herausforderungen in der Medizin.

Der Einsatz künstlicher Intelligenz in der Medizin (Artificial Intelligence in Medicine, AIM) ist keine neue Erfindung – im Gegenteil. Seit den frühen 1970er-Jahren existieren erste Forschungen, wie die erhöhte Nachfrage nach qualitativ hochwertigen medizinischen Leistungen gedeckt werden kann. Schon damals erhofften sich Forscher, Ärzte und andere Gesundheitsdienstleister vom Einsatz der Computertechnik Unterstützung bei klinischen Aufgaben wie der Diagnose, der Therapie und der Prognose. Für Szolovits und seine Kollegen stand außer Frage, dass KI und die Entwicklung der Computertechnik einen immensen Schub in allen Bereichen der Medizin und des Gesundheitswesens bringen würde.

Erfahrungsgemäß vergehen meist mehrere Dekaden, bis die Denkanstöße von Vordenkern die wissenschaftliche Diskussion in Gang bringen und diese Themen in der Folge in der öffentlichen Diskussion eine Rolle spielen. Konkrete Anwendungsmöglichkeiten von KI-Techniken entwarf Wahlster, der heute als CEO dem weltweit führenden Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) in Saarbrücken vorsteht. Er diskutierte bereits 1981 ein Konzept für den Einsatz von KI-gestützten Expertensystemen, die der Unterstützung von Medizinern bei ihrer Arbeit dienen sollten (Brauer 1981). Interessant an seinem Ansatz war, dass für ihn der Einsatz von KI-Technologien längst nicht nur auf Forschungseinrichtungen und finanzielle Kliniken beschränkt sein sollte. Vielmehr sollte die Nutzung von KI seiner Meinung nach durch den dezentralen Einsatz von Expertensystemen auch in kleinen und mittleren medizinischen Institutionen und Krankenhäusern technologisch und ökonomisch möglich werden.

Im Januar 2017, also fünfunddreißig Jahre nach der Veröffentlichung von Szolovits Publikation, traten die Google-Oberen Eric Schmidt und Jonathan Rosenberg im Rahmen der Podiumsdiskussion *Future Medicine: Artificial Intelligence (AI) in Healthcare* an und vertraten eine ähnliche Perspektive: Künstliche Intelligenz wird den medizinischen Fortschritt in vielen Bereichen voranbringen, aber sein volles Potenzial erst in einigen Jahren oder gar Jahrzehnten entfalten.

3.2 Was ist künstliche Intelligenz?

Unter dem Begriff der künstlichen Intelligenz können sich die wenigsten etwas Konkretes vorstellen. Umso schwieriger ist es, mögliche Anwendungsbereiche zu erkennen. Schon in Dürrenmatts Klassiker *Die Physiker* diskutieren die Protagonisten heftig über den Sinn und Unsinn des Einsatzes von neuen Techniken. Auch im Falle von KI gibt es aktuell hitzige gesellschaftliche Diskussionen zu Nutzen und Risiken.

Anhand eines herausragenden Beispiels zeigt sich, welchen Nutzen KI im Gesundheitswesen bieten kann. Im August 2016 meldeten verschiedene Medien übereinstimmend, dass IBMs KI-Vorzeigeprojekt *Watson* einer Patientin das Leben gerettet habe. Watson konnte einen seltenen Leukämie-Fall bei einer Frau in Japan diagnostizieren, an dessen Diagnose die Ärzte zuvor gescheitert waren¹. Watson wird am Medizinischen Institut der Universität Tokio eingesetzt.

Das Besondere an Watson ist seine Fähigkeit, riesige Datenmengen zu analysieren und zu vergleichen. Einer breiten Öffentlichkeit wurde Watson 2011 bekannt, als das KI-System den besten menschlichen Spieler im TV-Sprachratespiel *Jeopardy* schlug². Watson kommt

¹Artificial Intelligence Used To Detect Rare Leukemia Type In Japan (2016) NDTV. <https://www.ndtv.com/health/artificial-intelligence-used-to-detect-rare-leukemia-type-in-japan-1440789>. Zugegriffen: 29. Dezember 2017.

²Engadget: IBM's Watson Supercomputer Destroys Humans in Jeopardy (2011) https://www.youtube.com/watch?v=WFR3lOm_xhE. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

heute in verschiedenen Bereichen zum Einsatz, beispielsweise im Banken- und Finanzwesen³.

Im konkreten Fall kam Watson nach dem Vergleich von 20 Mio. klinischen Krebsstudien mit genetischen Daten zu dem Ergebnis, dass die Patientin an einer seltenen Form der Leukämie leidet. Das ÄrzteTeam der Universität Tokio um Arinobu Tojo herum hatte zuvor eine akute myeloische Leukämie diagnostiziert. Die bisherige Behandlung war aber ohne Erfolg geblieben. Watson konnte im konkreten Fall nicht nur die exakte Diagnose, sondern auch noch die geeignete Behandlungsempfehlung ermitteln, mit der das Leben der 60-jährigen Patientin gerettet werden konnte.

Dieses Beispiel zeigt, wo KI seine Stärken ausspielt: KI-Prozesse können gigantische Informationsmengen analysieren. Schenkt man dem NDTV-Bericht Glauben, konnte Watson die korrekte Diagnose innerhalb von zehn Minuten stellen. Satoru Miyano, Professor des Instituts an der Universität Tokio, zeigt sich euphorisch: Seiner Meinung nach habe KI in den kommenden Jahren das Potenzial, die Welt zu verändern.

Was aber ist nun KI genau? Wo und wie kann diese Technik im Gesundheitswesen eingesetzt werden? Wo liegt ihr Potenzial, wo sind ihre Grenzen? Und welche Anwendungsbereiche ergeben sich, die man bislang womöglich noch nicht gesehen hat?

³IBM Watson: IBM Watson Health and the Future of Healthcare (2015) <https://www.youtube.com/watch?v=jeCgQ5XrurY&feature=youtu.be>. Zugriffen: 2. Januar 2018.

Künstliche Intelligenz im Wandel der Zeit

Künstliche Intelligenz als Forschungsdisziplin wurde im Jahr 1956 im Rahmen des *Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence* geboren (Moor 2006). John McCarthy, Mathematikprofessor, hatte das Sommerprojekt damals ins Leben gerufen, um gemeinsam mit Experten darüber nachzudenken, welche Möglichkeiten Computer haben, Intelligenz zu beherbergen. Dieses Projekt sollte der Meilenstein für die KI werden, das Themengebiet definieren und eingrenzen. Der Begriff KI (Artificial Intelligence) ist ebenfalls auf McCarthy zurückzuführen.

Welche Themen unter den Begriff KI fallen, verändert sich im Laufe der Zeit. Themen, welche inzwischen routinemäßig von Computern ausgeführt werden können, fallen aus der Definition. Ein Beispiel hierfür ist die optische Zahlen- oder Bilderkennung, welche bereits als Verkehrsschilderkennung Standard in vielen Autos ist. Heute verstehen wir Aktivitäten, wie z. B. autonomes Fahren, intelligente Flugsimulatoren, interaktive Avatars auf Webseiten oder intelligente persönliche Assistenten wie *Alexa* als künstliche Intelligenz. KI könnte generell beschrieben werden als alles was Maschinen bisher nicht machen konnten und was wir generell als intelligent betrachten.

Im Zusammenhang mit KI werden häufig auch Begriffe wie Machine Learning oder neurale Netzwerke verwendet. All diese Begriffe sind Ansätze respektive Methoden, Computer oder Maschinen mit KI auszustatten.

Der Begriff Machine Learning bezeichnet die Fähigkeit, dass Computer eigenständig lernen, ohne explizit dafür programmiert zu werden. Der Begriff wurde 1959 von

Arthur Samuel, einem Pionier der KI, erstmals definiert⁴. Machine Learning basiert auf Mustererkennung (Pattern Recognition) und Wahrscheinlichkeiten. Wir benutzen es täglich, z. B. mit unseren Spam-Filtern.

Neurale Netzwerke versuchen den Computer beizubringen, dass sie das menschliche Denken „nachahmen“, d. h. dass sie Informationen klassifizieren wie wir Menschen, dabei aber alle Vorteile der Computer beibehalten, d. h. schnell, präzise und unvoreingenommen sind (Marr 2016). Das Lernen geschieht hier über Feedback Loops, welche validieren, ob Entscheidungen richtig oder falsch waren und die zukünftigen Entscheidungen daraufhin anpassen. Zum Beispiel kann ein neuronales Netzwerk (mittels Daten, welche initial eingegeben werden) angelernt werden, basierend auf Komponenten, welche sie enthalten, Bilder zu erkennen.

Der Einsatz von künstlicher Intelligenz

Da moderne Medizin im hohen Maß auf der Verarbeitung von (Bild-)Daten basiert, bieten gerade KI-Lösungen vielversprechende Ansätze bei der Segmentierung, der Diagnose und der bildgestützten Therapie. Qualitativ hochwertige Datensätze sind dabei das präferierte Futter von KI-Umgebungen. Google hat mit dem von ihm gegründeten Unternehmen *DeepMind* gezeigt, wie KI Computerspiele im Nu beherrscht, und zwar auf einem Level, der bislang von Menschen nicht erzielbar ist. Bei KI spielen

⁴Wikipedia: Machine Learning (2017) https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Machine_learning&oldid=817402244. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

verschiedene Bereiche zusammen: Machine Learning und Deep Learning. Mithilfe von neuronalen Netzen beginnen die Computer mit der Identifikation von relevanten Mustern. Im nächsten Schritt kommen dann weitere Ebenen hinzu, mit denen sich Kanten, Formen und Objekte erfassen lassen. Das Grundprinzip ist dem menschlichen Gehirn nachempfunden. Der Clou: Je mehr Daten man mit KI-Systemen verarbeitet, desto besser wird das Ergebnis. Während das menschliche Gehirn und der Mediziner im Krankenhausalltag bei einer Informationsflut eher einen *Buffer Overflow* erleiden, können KI-Systeme nicht genug Input bekommen. Im Idealfall lernt ein medizinisches KI-System und wird so trainiert, dass es beispielsweise bei CT-Bildern potenzielle Mutationen oder Karzinome eigenständig diagnostiziert – und zwar mit einer Präzision, bei der der Mensch nur staunen kann.

Was die Software lernt und wie sie lernt, bleibt dem externen Betrachter verborgen und ist auch nur bedingt mit der Art und Weise des menschlichen Denkens vergleichbar. Letztlich entscheiden die Ergebnisse. Und diese sprechen eine eindeutige Sprache: KI-Systeme sind erwiesenermaßen hervorragend zur Diagnose von erkranktem Gewebe, zur Segmentierung von erkranktem Gewebe und zur Diagnose von Krebs und Krebszellen geeignet.

Wie die Kooperation namhafter medizinischer Forschungseinrichtungen zeigt, ist all das längst keine Zukunftsmusik mehr, sondern bereits Realität. Forscher der Harvard University, des Münchener Helmholtz Zentrums, des Londoner Francis Crick Institute und der Newcastle Upon Tyne University nutzen KI-Technologien bereits, z. B. zur Krebszellenidentifikation.

Eine generell nützliche Klassifikation von KI-Anwendungen schlagen Davenport und Ronanki (2018) vor. Dabei wird in erster Linie über den Businessnutzen nachgedacht. Daraus ergeben sich drei Typen von KI:

- Prozessautomatisierung (*robotic process automation, RPA*),
- kognitive Einsichten (*cognitive insights*),
- kognitives Engagement (*cognitive engagement*).

Prozessautomatisierung erklärt sich von selbst. Beispiele sind Datentransfer aus verschiedenen Quellen in eine elektronische Krankenakte. Kognitive Einsichten entstehen aus dem Lesen von Mustern, wie oben beschrieben. Ein Beispiel dafür ist die Interpretation von radiologischen Bildern. Kognitives Engagement ist der Gebrauch von z. B. Chatbots wie *Ada*, die sich sozial mit Patienten oder Kunden austauschen.

3.3 Goldrauschstimmung

Der Einsatz von KI wird rund um den Globus vielversprechende Anwendungs- und Optimierungsmöglichkeiten bieten. In den modernen Industrienationen wird KI helfen, insbesondere ineffiziente Gesundheitsstrukturen zu optimieren. Das amerikanische Gesundheitswesen gilt als eines der ineffizientesten und verschlingt Jahr für Jahr fast ein Fünftel des Bruttoinlandsprodukts. Im Vergleich dazu erscheinen die Kosten, die das Gesundheitssystem in Deutschland mit rund 11 % des Inlandsprodukts

benötigt, als fast vernachlässigbar. Eine Analyse von Accenture schätzt, dass KI im US-System im Jahr 2026 bis zu 150 Mrd. US\$ pro Jahr einsparen kann (Miliard 2017). Dabei sollen die folgenden Technologien der KI den wesentlichen Beitrag leisten:

- Roboterassistierte Chirurgie (40 Mrd. US\$),
- virtuelle Pflegehilfen (20 Mrd. US\$),
- Optimierung administrativer Prozesse (18 Mrd. US\$),
- Betrugserkennung und Vorbeugung (17 Mrd. US\$),
- Reduktion von Dosierungsfehlern (16 Mrd. US\$),
- virtuell verbundene Geräte (14 Mrd. US\$),
- optimierte Erkennung von Patienten für klinische Studien (13 Mrd. US\$),
- bessere Diagnosestellung (5 Mrd. US\$),
- automatisierte Beurteilung von Bildern in der Diagnostik (3 Mrd. US\$),
- Cybersecurity (2 Mrd. US\$).

Vor dem Hintergrund steigernder Gesundheitskosten können wir erwarten, dass KI eine zentrale Rolle in den obigen Anwendungen spielen wird. Darüber hinaus werden neue Märkte- und Anwendungen durch KI aufgehen. Die großen Unternehmen Google, IBM und Microsoft haben bereits den Gesundheitsmarkt ins Visier genommen und Anwendungen für die Pathologie, prädiktive Analytik oder Präzisions-Onkologie entwickelt (Bresnick 2017).

Wie der Bericht von CB Insights zeigt, ist neben den KI-Veteranen durchaus Platz für kleine innovative Start-ups. Laut dem Bericht haben sich die Angebote für gesundheitsbezogene KI-Unternehmen seit 2011 Jahr für

Jahr erhöht, seit 2014 mehr als verdoppelt. Dabei tummeln sich vermehrt Start-up-Unternehmen, die ihre Chance suchen.

Eine weitere spannende Zahl belegt das wirtschaftliche Potenzial: Alleine in 2015 konnten Unternehmen, die auf KI-Lösungen im Gesundheitswesen spezialisiert sind, 15 % des globalen KI-Marktes bedienen. Tendenz wahrscheinlich steigend.

Die Zukunft von KI-Lösungen und deren Potenzial bewertet auch Dave Dimond, CTO des Bereichs Global Healthcare bei Dell positiv: Seiner Meinung nach werden KI und maschinelles Lernen ihre Stärken als „Begleitdiagnostik“ ausspielen und den Medizinern als maschinell lernende Begleiter klinischen Rat geben. Die begleitende Diagnose wird Dimond zufolge die Massenmedizin zu einer personalisierten Medizin verändern. Damit wird sich aber auch die Rolle des traditionellen Arztes grundlegend verändern.

Auch Ginni Rometty, seit 2012 CEO und Präsidentin bei IBM, spart nicht mit Begeisterung: Sie sieht in der Verwendung von KI-Technologien einen tief greifenden Wandel des Gesundheitssystems. Rometty: „Wir können Dinge neu erfinden, und ich denke, es liegt in unserer Macht, die Welt zum Besseren zu verändern“⁵.

Romettys Begeisterung teilen unzählige kleine Start-up-Unternehmen, die mit zum Teil vielversprechenden

⁵10X: IBM CEO Watson AI Will Change Everything in Healthcare Radiologists Will Lose Jobs Soon. <https://www.youtube.com/watch?v=VqgkEqABBQ>. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

Entwicklungen auf den Markt drängen. Dabei scheint die Zahl der Start-ups unmittelbar mit dem Zustand des jeweiligen Gesundheitssystems des Herkunftslandes zu korrelieren: Je schwieriger die aktuelle Situation, umso produktiver scheinen die Entwickler zu sein.

3.4 Anwendungen im Gesundheitswesen

Bessere Diagnosestellung

Die Stärken von KI liegen im Vergleich und in der Analyse von abstrakten Mustern, wie man sie beispielsweise bei Röntgenbildern findet. Da eine KI-Umgebung mit jeder Bildanalyse dazulernt, wird sie auch mit jedem Arbeitsschritt besser. Das gilt insbesondere für jeden Tumorbefund. Doch mit der reinen Bildanalyse und dem Vergleich Millionen bestehender Befunde ist KI längst nicht am Ende. Vielmehr lassen sich diese Ergebnisse mit Daten aus der Mikrobiologie, der Virologie, der Pathologie und der Genetik kombinieren. Auch das alles voll automatisiert.

Das zentrale Problem liegt nicht so sehr auf der technischen, sondern auf der regulativen Seite: Nicht alles, was technisch möglich ist, ist auch im Sinne der Patienten. Dennoch sehen Experten aus dem Klinikbetrieb primär die Vorteile. Die meisten Praktiker sehen die Diagnostik in der Hochleistungsmedizin in den kommenden zehn Jahren vor einem dramatischen Wandel.

Ein Bericht des Forbes-Magazins zeigt, in welchen Szenarien der Einsatz von KI-Technologien besonders lohnend und sinnvoll ist (Kite-Powell 2017). China ist das Land mit der höchsten Lungenkrebsrate weltweit. Alleine in 2015 kamen 700.000 neue Fälle von Lungenkrebs hinzu. Zur Diagnose und Therapie stehen 80.000 Radiologen zur Verfügung, die rund 1,4 Mrd. radiologische Scans pro Jahr durchführen.

Die chinesischen Mediziner können bislang den hohen Bedarf an Spezialisten und den notwendigen diagnostischen Ressourcen kaum decken. Daher setzen Radiologen im Shanghai Changzheng-Krankenhaus seit geraumer Zeit KI-Technologie von Infervison ein, um die medizinische Diagnose beim Lesen von CT-Scans und Röntgenbildern zu verbessern. Die Technik dient der Identifikation von verdächtigen Läsionen und Knoten bei Lungenkrebspatienten.

Dazu erweiterte Infervison, die mit GE Healthcare, Cisco und Nvidia zusammenarbeiten, die bestehende computergestützte Tomografie mit KI-Funktionen. Die KI-Umgebung ist so konzipiert, dass sie die Kerncharakteristika von Lungenkrebs lernt und dieses Wissen kontinuierlich erweitert, um mögliche Krebsmerkmale in Bildsequenzen zu ermitteln. Von diesem Ansatz erhoffen sich die chinesischen Mediziner, Diagnosen zu verbessern und insbesondere die Früherkennung zu optimieren.

Auch das britische Gesundheitssystem steht seit geraumer Zeit vor großen Umwälzungen. Anfang 2017 wurde bekannt, dass der britische National Health Service versucht, mit einer mobilen Gesundheits-App eine Änderung im Gesundheitssystem herbeizuführen und das

System kostengünstiger gestalten. Die App nutzt künstliche Intelligenz und soll zunächst mithilfe einer Million Londoner getestet werden. Das primäre Ziel ist dabei die Verbesserung der Diagnose und Behandlung von Patienten.

Die von Babylon Healthcare Ltd. programmierte Smartphone-App erlaubt Echtzeit-Textkonversationen zwischen Patienten und dem medizinischen Dienst (Chapman 2016). Dabei verwendet das System intelligente Algorithmen, um erste Diagnosen zu erstellen. Dieser Sichtungsprozess wird auch als *Triage* bezeichnet. Um die Effizienz des Systems zu testen, wurden Vergleichsuntersuchungen mit fiktiven Patienten durchgeführt.

Das Duell zwischen App und Fachpersonal ging unentschieden aus. Allerdings war die künstliche Intelligenz schneller und verursachte deutlich geringere Personalkosten. Dieser Vergleich zeigt, dass KI sicherlich seine Berechtigung hat, aber den menschlichen Mediziner nicht in Kürze ersetzen, sondern eher ergänzen wird. KI kann in vielen medizinischen Bereichen die dringend benötigte Unterstützung bieten. Außerdem kann KI eine Antwort auf die aktuellen (Finanzierungs-)Probleme sein.

Das Beispiel Babylon zeigt, dass KI-Funktionen insbesondere die Früherkennung und Diagnose unterstützen können. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die KI-gestützte App Your.MD⁶. Ihr Ziel ist die Verbesserung der Gesundheitsgrundversorgung. Dazu befragt die App den Benutzer nach seinen Symptomen und liefert leicht verständliche

⁶Health A-Z, Your.MD. <https://www.your.md/atoz/>. Zugegriffen: 1. Januar 2018.

Informationen. Die Befragung durch einen digitalen Assistenten basiert auf Natural Language Processing, einer Technik der Computerlinguistik, die natürliche Sprache mithilfe von Computeralgorithmen interpretiert (Dickson 2017). Die Your.MD-Plattform verfügt über ein riesiges Netzwerk von Informationen, die Symptome mit Ursachen verknüpfen. Your.MD schlägt Schritte und Maßnahmen zur Behebung der Krankheit vor.

Ein weiteres schönes Beispiel für eine Evolution der Diagnosestellung ist der KI-gestützte Chatbot *Buoy* von Buoy Health aus den USA. Jeder Internetnutzer kann dort in wenigen Schritten, basierend auf seinen Symptomen und seiner medizinischen Geschichte, eine Liste von Verdachtsdiagnosen bekommen, die meiner Erfahrung nach erstaunlich akkurat ist⁷.

Prävention und bessere Therapie

Das medizinische Wissen wächst Jahr für Jahr in einem unglaublichen Tempo. Kein Arzt kann hier mithalten, was dazu führt, dass die Behandlungsqualität von Patienten nicht einheitlich gut ist, sondern davon abhängt, von wem man behandelt wird. Der Versuch, mittels Behandlungsrichtlinien dagegen anzugehen, ist ein erster Schritt. Doch dies erlaubt bei Weitem nicht, Patienten individuell nach dem neuesten Wissensstand zu therapieren (Chin und Satell 2016).

Hier kommt die Stärke von KI, Muster zu erkennen, zum Einsatz. Ärzte können schon heute Daten eines

⁷Siehe Chatbot unter <https://www.buoyhealth.com>.

neudiagnostizierten Patienten mit einer großen Datenbank ähnlicher Patienten abgleichen und dabei sehen, wie diese behandelt wurden und was erfolgreich war. Dies erlaubt *evidenzbasiert* Patienten mit seltenen oder hochkomplexen Erkrankungen zu therapieren, auch wenn der Arzt darin wenig Erfahrung hat. Voraussetzung dafür ist der Zugang zu großen Patientenpools. Ein Beispiel hierfür hat das Unternehmen Modernizing Medicine entwickelt. Elektronische Krankenakten erlauben es Ärzten zu sehen, wie ihre Fachkollegen USA-weit ähnliche Patienten behandelt haben.⁸

Kliniken benutzen ähnliche Systeme, um Risikopatienten frühzeitig zu identifizieren und die Behandlung individuell anzupassen. Beispiele hierfür sind Patienten mit höherem Risiko einer Rehospitalisierung oder postoperativen Infekten oder Patienten mit hohem Risiko für ein akutes Nierenversagen.

Dr. Eric Horvitz, Managing Director of Microsoft Research Goldmine, sieht die Daten, welche heute in den elektronischen Krankengeschichten enthalten sind, als wahre Goldminen (Hernandez 2014). Sie sind heute aber häufig nicht online, nicht verbunden, in inkompatiblen Systemen oder folgen keiner einheitlichen Nomenklatur. Zum Beispiel beschreibt ein Arzt einen Krebs als *Stadium IV*, ein anderer als *entfernt metastatisch*. Erfolgreich wird KI dann werden, wenn wir es schaffen, große

⁸Modernizing Medicine, iPad-Based Electronic Medical Record (EMR) Systems, *Modernizing Medicine*. <https://www.modmed.com/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

Datenmengen über Kliniken, medizinische Fachgebiete und idealerweise Länder hinweg in sogenannte *Data lakes* (Datenseen) zu integrieren, in einer einheitlich konsistenten Datenqualität. Das ist heute noch unglaublich schwierig und kostspielig. Doch die Zusammenführung von Daten wird in Zukunft einfacher durch Vereinheitlichung von Standards, getrieben durch die Gesundheitsbehörden, welche größtes Interesse daran haben, Kosten durch bessere Datennutzung zu reduzieren und dabei gleichzeitig die Qualität der Therapie zu verbessern. Europa wird hier leider gegenüber den USA über Jahre im Hintertreffen bleiben. Die zahlreichen Landessprachen sowie die unzähligen klinikspezifischen Datensysteme werden die nötige Integration von Patientendaten deutlich erschweren. Zusätzlich wird der Schutz dieser Daten enorm wichtig sein, da wir perspektivisch sogar unsere genetischen Daten teilen werden. Unvorstellbar, welchen Schaden Hacker anrichten könnten, beim Zugriff aus unsere intimste Privatsphäre.

Doch wir sehen Ansätze, die mich positiv stimmen, dass wir uns hier schneller bewegen werden, als erwartet. Im Januar 2018 hat Apple angekündigt, eine Schnittstelle zwischen dem Apple Health Kit (wo Gesundheitsdaten dargestellt werden) und elektronischen Krankenakten einzuführen⁹. Damit könnten Patienten von ihrem iPhone aus auf ihre Gesundheitsdaten aus Kliniken oder anderen

⁹Apple Announces Solution Bringing Health Records to iPhone (2018) *Apple Newsroom*. <https://www.apple.com/newsroom/2018/01/apple-announces-effortless-solution-bringing-health-records-to-iPhone/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018.

Institutionen zugreifen. Spannend daran ist einmal mehr, dass ein Unternehmen, welches kein Gesundheitsunternehmen ist, sondern aus einer vollkommen anderen Sparte kommt, einen großen Einfluss darauf haben wird, wie wir Gesundheitsdaten in Zukunft handhaben werden. Und wahrscheinlich wird dies auch dazu führen, dass der Patient, respektive der Konsument, Herr über seine Daten werden wird – im Gegensatz zu heute, wo wir keinen oder nur wenig Einfluss auf unsere Gesundheitsdaten haben (obwohl sie in den meisten Ländern rechtlich uns gehören).

Im Bereich der Prävention wird KI viel bewegen. Durch Erkennen von Zusammenhängen zwischen unserem Verhalten (z. B. Schlaf, Ernährung, Bewegung) und Vitalparametern (z. B. Herzfrequenzvariabilität, Atemfrequenz, Glukose-Levels) wird es in Zukunft möglich sein, vorzuschlagen, was wir ändern sollen oder können, um gesund zu bleiben oder gesund zu werden. Heute ist dies noch schwer denkbar. Die meisten Fitnesstracker erheben zwar schon Daten (Herzfrequenz, Schritte, Schlaf), doch es ist notwendig, dass wir von Hand unsere Ernährung, Stress etc. ergänzen. Darauf haben nur wenige Lust. Wenn aber in den nächsten Jahren Daten verschiedener Tracker zusammengeführt werden können und diese auch noch sinnvoll sind (z. B. eine Brille, die tatsächlich erkennt, wieviel und was wir essen), dann wird das Ganze spannend und sinnvoll.

Das Start-up-Unternehmen LARK aus den USA ist ein sehr spannendes Beispiel, wie die KI die Prävention und generell den traditionellen Behandlungs- und

Beratungsansatz infrage stellen kann¹⁰. LARK hat einen KI-basierten Chatbot entwickelt, der Patienten in verschiedenen chronischen Krankheiten, wie z. B. Diabetes oder Hypertension, coacht. So sollen Patienten ihre Gesundheit besser in den Griff bekommen und dadurch die Kosten im System, vor allem für die Krankenversicherer, senken. Die KI wurde so gut trainiert, dass sie eine höchst personalisierte Unterhaltung mit den Patienten führen kann. Und dies 24/7, 365 Tage im Jahr.

Einen neuen Weg in der Prävention geht auch Kanada. Die Regierung plant mittels KI soziale Medien zu analysieren, um so Leute, die suizidgefährdet sind, zu finden und vor einem Suizid zu schützen (Jarrett 2018). Sie wollen in einem Pilotprojekt testen, ob soziale Medien darauf schließen lassen, ob jemand einen Selbstmord plant. Falls ja, würde präventiv Hilfe aufgeboten werden.

Vermeidung von Ineffizienzen und Betrugsvorbeugung

Neben den verbesserten diagnostischen Möglichkeiten profitiert die ökonomische Seite des Gesundheitswesens von KI-Techniken. Präzise und extrem schnelle Datenanalytik wird dazu führen, dass es zu weniger diagnostischen Verzögerungen und zu weniger Doppeluntersuchungen kommt. Weitere Ineffizienzen lassen sich durch moderne Technik deutlich reduzieren. Das viel zitierte „Millionengrab Diagnostik“ kann weitgehend geschlossen werden. Davon profitieren im zweiten Schritt auch die Krankenkassen und das gesamte System, weil Effizienzsteigerungen

¹⁰Lark (2017) <http://www.web.lark.com/>. Zugegriffen: 5. März 2018.

und Kostenreduktionen allen Systemkomponenten zugutekommen. Mediziner können ihre Zeit verstärkt dem Patienten widmen – so zumindest die Theorie.

Ein weiteres Gebiet, wo KI seine Stärken ausspielen wird, ist die Betrugserkennung und Vorbeugung (Yu 2017). Das Unternehmen Shift Technology hat heute bereits in den USA eine 75-prozentige Genauigkeit beim Erkennen von *Insurance Claims* mittels kognitiver KI¹¹. In der Zukunft werden (wo das Gesundheitssystem es zulässt) Arztrechnungen individuell mittels KI darauf geprüft, ob sie aus dem Raster fallen und markiert, sollten sie nicht im Einklang mit den zu erwartenden Interventionen sein. Natürlich wird dies eine ganze Reihe von Problemen zwischen der Ärzteschaft und Versicherern mit sich bringen. Doch wir sind aktuell an einem Punkt, an dem die meisten westlichen Gesundheitssysteme nicht mehr wissen, wie sie zukünftig die Gesundheitsversorgung finanzieren sollen. Dies betrifft sogar die reichsten Länder der Welt, wie z. B. Norwegen. Vor dem Hintergrund, dass wir es uns kaum leisten können, Ineffizienzen zu finanzieren (z. B. eine Behandlung, die nachgewiesenermaßen bei einem Patienten nicht sinnvoll ist), werden sich über die nächsten Jahre hinweg diese Systeme durchsetzen.

¹¹Shift Technology (2018) <https://www.shift-technology.com/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

3.5 Potenzial für neue Berufe und Geschäftsmodelle

Schätzungen zufolge werden bis im Jahr 2021 sechs Prozent aller Jobs in den USA durch KI-unterstützte Roboter ersetzt werden. Anfänglich werden dies Berufe z. B. im Transportwesen sein (Solon 2016). Doch über die Zeit hinweg werden auch komplexere Berufsbilder davon betroffen sein. Dass KI auch den Arztberuf in den nächsten Jahrzehnten grundlegend ändern wird, ist sehr wahrscheinlich. Richard und Daniel Susskind erläutern, nachdem sie über 100 Experten befragt haben, dass bereits heute grundlegende Änderungen den Beruf neu definieren (Susskind et al. 2016). Sie glauben, dass der Arztberuf teilweise ersetzt wird, und dass das Argument, *Empathie* sei nicht zu ersetzen, dem nicht im Wege stehen wird. Das hat nicht nur negative Aspekte zur Folge. Es kann auch dazu führen, dass sich Ärzte auf wirklich wichtige Aufgaben konzentrieren können, wie die „ergänzende“ klinische Untersuchung oder das persönliche Gespräch, ohne jedes Mal Routinedetails abfragen zu müssen (Vize 2017).

Rund um den KI-Einsatz in der Medizin werden aber auch eine Fülle neuer Berufsbilder entstehen. Dabei werden Berufe, wie der *Medizinisch-technische KI-Assistent* (oder wie auch immer er heißen mag) entstehen, in denen die medizinischen Nachwuchskräfte nicht erst zehn Jahre und mehr bis zur Approbation benötigen, sondern bereits nach einer kurzen Ausbildung als KI-Spezialist arbeiten können. Dabei dürften gerade auch die kurzen Ausbildungszeiten für junge Menschen interessant sein. In den

USA verlassen junge Ärzte die Medical School im Durchschnitt mit durchschnittlich 160.000 US\$ Schulden. Es dauert Jahre, bis ihre Kredite zurückgeführt sind. Diesen Schuldenberg könnte man durch die Wahl eines anderen Berufszweiges deutlich reduzieren.

Die Nutzung solcher Systeme wird nicht schwieriger als die Bedienung eines Geldautomaten sein. Der Assistent wird das System mit zehn bis 20 Grundinformationen pro Patient speisen. Alle weiteren Diagnoseschritte können dann beispielsweise interaktiv erfolgen. Sofern Bildmaterial verfügbar ist, das aus MRTs oder anderen Quellen stammt, werden Upload-Funktionen zur Verfügung stehen, um diese Daten einzulesen und einer Analyse zuzuführen. Da Ärzte und medizinisches Personal an Veränderung gewohnt sind, werden sie relativ schnell mit den neuen Techniken zureckkommen. Den größten Nutzen werden Patienten von der Einführung von KI-Technologien haben. Da Computer – im Unterschied zu uns Menschen – Diagnosen nie vergessen, kann die Selbstlernfähigkeit der KI-Systeme gerade Forschungsvorhaben unterstützen und die Behandlung seltener Krankheiten erheblich effektiver gestalten.

KI-Technologien sind komplex und nicht einfach zu verstehen. In Zukunft werden Experten benötigt, die sich sowohl in der Medizin als auch in der Computer-technik auskennen. Dazu werden neue Ausbildungs-formen und die Schaffung neuer Berufsbilder notwendig. Um KI im Gesundheitswesen werden eine Vielzahl von Dienstleistungen entstehen, angefangen beim Consulting bis zur Forschung und Entwicklung. Besonders hohes Potenzial dürfte die Verknüpfung von

Mobilgeräten und KI-basierten Dienstleistungen aufweisen. Die App-Entwicklung könnte damit einen ganz neuen Bereich für sich erschließen – gerade auch in Verbindung mit Fitnesstrackern.

Doch trotz all dieser Entwicklungen der KI werden gewisse Schritte nicht einfach ersetzt werden können, wie z. B. die manuelle Untersuchung von Patienten oder die Befragung von Patienten, die nicht über ihre Krankheit sprechen möchten. Der Arztberuf wird nicht aussterben. Er wird sich aber grundlegend verändern. Wahrscheinlich sehr zum Wohl des Patienten, der nicht mehr durch ein intransparentes Gesundheitswesen navigieren muss, um die beste Hilfe zu bekommen.

3.6 Demokratisierung der Gesundheitsversorgung

Während der Einsatz von KI in modernen Volkswirtschaften entscheidend zur Qualitätssteigerung bei gleichzeitiger Kostensenkung beitragen kann, sehen Experten auch enormes Potenzial bei der Betrachtung der globalen Dimension. In weniger entwickelten Ländern können neue Berufsbilder, wie z. B. der *Physicians Assistant*, entstehen, der in der Lage ist, mithilfe der selbstlernenden Programme Diagnosen zu stellen und zielgerichtete Therapien zu empfehlen. Das Potenzial für vergleichsweise schnell angelerntes Personal ist immens, denn damit ließen sich in einem überschaubaren Zeitfenster die gigantischen medizinischen Versorgungslücken weltweit zumindest

teilweise schließen. Die Physicians Assistants könnten im Idealfall, mit einem Tablet oder Notebook ausgestattet, ein KI-System mit Beschwerden der Patienten füttern und das System seine Arbeit machen lassen. Im interaktiven Modus kann der Assistent das Krankheitsbild weiter eingrenzen – nach dem gleichen Schema, wie die meisten Diagnosen durch Ärzte erfolgen. Im Unterschied zu einem niedergelassenen Arzt kann ein KI-System mit handfesten Informationen und Wahrscheinlichkeiten aufwarten: Es kann nicht nur die Wahrscheinlichkeit ermitteln, mit der die getroffene Diagnose zutrifft, sondern es kann auch feststellen, welches die nach wissenschaftlichen Untersuchungen ideale Therapie ist und wie hoch die Heilungschancen sind. KI-Systeme sind in diesem Bereich somit den menschlichen Ärzten voraus – zumindest soweit es die Analyse riesiger Datenmengen betrifft.

Diese Kombination aus Zugang zu dem gesamten medizinischen Wissen, gespeichert in der Cloud und „smartten Algorithmen“, welche anhand der Symptome und Patientengeschichte eine Verdachtsdiagnose stellen, hat das Potenzial, die Gesundheitsversorgung Leuten möglich zu machen, welche zuvor keinen Zugang zu medizinischer Versorgung hatten. Afrika wird eine der Regionen sein, die enorm davon profitieren wird. Die Verbreitung von Smartphones wächst rasend schnell. Bereits heute werden spannende Technologien im Gesundheitswesen genutzt, und der Bedarf, den Mangel an Ärzten und Infrastruktur zu verbessern, ist enorm (Alonge 2017). Ein idealer Ausgangspunkt, welcher tatsächlich dazu führen könnte, dass Länder in Afrika mangels

politischer Lähmung des Gesundheitswesens, uns in einzelnen Anwendungsbereichen der KI davonlaufen.

3.7 Ausblick

Keine Frage: Die KI-Technologie hat das Tor in eine neue Dimension der Medizintechnik aufgestoßen. Auch wenn die bisherigen Projekte überwiegend Leuchtturm-Charakter haben, ist klar, wohin die Reise gehen wird: In Zukunft werden immer mehr Sensoren, Datenquellen und Forschungsergebnisse miteinander kombiniert. Unternehmen wie Apple und Google, IBM sowieso, arbeiten längst intensiv an Lösungen, die die notwendige Technik und Kapazitäten bereitstellen. Auch wenn die Unternehmen primär wirtschaftliche Interessen vertreten, existiert ein Konsens darüber, dass nur eine Kooperation zwischen IT und Medizinern langfristige Erfolge verspricht. Britische Krankenhäuser kooperieren beispielsweise mit Google und stellen für die KI-Verarbeitung 1,6 Mio. Patientendaten zur Verfügung. Auch Apple geht mit seinem Research Kit einen ähnlichen Weg.

KI wird nicht nur bei der Diagnose von Krankheiten eine immer wichtigere Rolle spielen, sondern auch helfen, unser Verständnis von Genen, von Proteinen, der Wirkung von Medikamenten und vielem mehr zu verbessern. Da die Mechanismen in KI-Systemen sowie die Art und Weise, wie diese die Daten interpretieren, weitgehend im Verborgenen agieren, werden Wissenschaft, Medizin und Politik Regeln implementieren müssen, die die Techniknutzung eindeutig eingrenzen. In manchen Publikationen

ist bereits vom „Kollegen KI“ die Rede. Mit diesem werden Mediziner in Zukunft eng zusammenarbeiten (müssen) – und zwar auf höchstem Niveau.

Der Einsatz des Smartphones wird in diesem Kontext in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. In naher Zukunft werden Millionen Smartphone-Nutzer in den Genuss neuer Techniken gelangen. Forscher an der Stanford University haben einen KI-Algorithmus entwickelt, der Hautkrebs identifizieren kann (Esteva et al. 2017). Dazu haben die Wissenschaftler ihren Lernalgorithmus mit 130.000 Bildern von Hautausschlägen und Läsionen gefüttert. Die Forschungsergebnisse sollen perspektivisch in einer mobilen App münden, mit der jeder ein kostengünstiges Screening mit seinem Mobilgerät durchführen kann.

Bei aller Begeisterung von bereits von KI-Lösungen gezeigten Möglichkeiten und dem längst nicht ausgeschöpften Potenzial, das uns die lernenden Maschinen bescheren, werden doch auch immer wieder kritische Stimmen laut. Der Mangel an Kontrolle über autonom agierende KI-Systeme, eine generelle Technikskepsis und der Verlust von Arbeitskräften treibt viele Patienten, Mediziner und Politiker um.

Vergleichsweise wenig Sorgen wird man sich bis auf Weiteres um die Arbeitsplätze machen müssen. KI-Systeme dienen der Unterstützung der Mediziner und werden ihnen Arbeiten abnehmen, die sie selbst nicht leisten können. Allerdings gibt es auch andere Stimmen. So wird IBMs CEO Ginni Rometty mit folgenden Worten zitiert: „Watson AI will change everything in Healthcare.

“Radiologists will lose jobs soon”¹². Die Wahrheit wird sich vermutlich irgendwo zwischen den beiden Extremen eingependeln.

In der Praxis wird es immer wieder Befunde geben, die nicht eindeutig sind und einer Beurteilung durch einen erfahrenen Spezialisten bedürfen. Bei der Beurteilung von Röntgenbefunden, von Laborergebnissen, der Auswertung sonstiger Gesundheitstests etc. bleibt der Mensch immer die letzte Instanz.

Kritische und ganzheitliche Auseinandersetzungen sind ohnehin selten. Eine der wenigen Ausnahmen stammt von Deborah Lupton (2014). Die Autorin bemängelt die wenigen kritischen Publikationen bzgl. des Einsatzes digitaler Technologien im Gesundheitswesen. Sie wirft insbesondere Fragen der Implikation auf das Arzt-Patienten-Verhältnis auf und fordert eine Diskussion, die sich ganzheitlich auch mit ethischen Aspekten, der Sicherheit und dem Datenschutz beschäftigt.

Es werden dennoch auch ernst zu nehmende Stimmen laut, die die KI-Nutzung und ihre Effektivität kritisch bewertet. Semigran et al. kommen beispielsweise in einer Studie beim Vergleich diagnostischer Genauigkeit von Arzt und KI-System zu dem Ergebnis, dass der Mediziner die Algorithmen um Längen übertrifft (Semigran et al. 2016).

Und nicht alle fühlen sich wohl mit der rasanten technologischen Entwicklung im Gesundheitswesen. Alleine der Begriff *künstliche Intelligenz* weckt heute bei

¹²10X. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

vielen Menschen Ängste. Sie fürchten, dass sich derart intelligente Programme verselbstständigen und ein Eigenleben entwickeln, das nicht mehr steuerbar ist. Ganz unberechtigt sind solche Bedenken nicht, denn bei künstlicher Intelligenz handelt es sich teilweise um *Software*, die sich eigenständig weiterentwickelt. KI-Software kann – im Unterschied zu anderer Software, die wir vom heimischen Notebook oder von der Umgebung am Arbeitsplatz kennen – lernfähig und autark agieren. In verschiedenen Wirtschaftsbereichen wird diese Technik längst erfolgreich eingesetzt, beispielsweise in der industriellen Produktion. Auch autonomes Fahren wird ohne KI-Unterstützung kaum möglich werden. Die Großen der IT- und der Telekommunikationsbranche, wie Google und die Deutsche Telekom, setzen bereits seit geraumer Zeit KI-Lösungen ein.

Wirft man einen Blick in ein modernes medizinisches Labor, so findet man dort schon heute meist semi-automatische Laborstraßen, in denen Blut, Urin, andere Flüssigkeiten und Proben untersucht werden. Hier trifft man kaum noch Laboranten an. Und falls doch, sind sie überwiegend für die Steuerung und Überwachung der Laborumgebung zuständig.

Die größte Angst besteht darin, dass KI so klug werden könnte, dass sie besser als das menschliche Gehirn funktioniert und gar die Kontrolle über die Menschen erlangen könnte. Geschürt werden solche Ängste durch die klügsten Köpfe, die die Menschheit hervorgebracht hat (Cellan-Jones 2014). So äußerte der berühmte Astrophysiker Stephen Hawking, dass die Entwicklung der künstlichen Intelligenz das Ende der menschlichen Rasse

einläuten könnte¹³. Elon Musk, der durch seine Teilhabe an der Gründung des Onlinebezahlsystems PayPal sowie seine Erfolge mit dem privaten Raumfahrtunternehmen SpaceX und dem Elektroautohersteller Tesla bekannt geworden ist, teilt diese Einschätzung (Gibbs 2017).

Es steht heute außer Frage, dass KI das Gesundheitswesen grundlegend verändern wird. Wie bei allen neuen Techniken existieren auch beim KI-Einsatz verschiedene Hemmnisse. Sicherheit, Datenschutz und die Wahrung des Patientengeheimnisses sind dabei die zentralen Herausforderungen. Verschiedene Hersteller von KI-Lösungen denken über die Verwendung von Blockchain (Kap. 5) nach. Dieser Mechanismus stellt die Integrität der Daten sicher und bietet einen Schutz vor nachträglichen Manipulationen.

In naher Zukunft wird aber kein Algorithmus in der Lage sein, die sozialen und fachlichen Kompetenzen von Ärzten und Krankenschwestern zu emulieren. KI wird – wie die meisten anderen neuen Technologien – dazu dienen, die Gesamtqualität und Verfügbarkeit von Gesundheitsdienstleistungen zu verbessern.

¹³GeoBeats News, Stephen Hawking Says Artificial Intelligence Is A Threat To Human Existence (2014) <https://www.youtube.com/watch?v=bv7HxfuKLxI>. Zugriffen: 1. Januar 2018.

Quellen und Literatur

10X: IBM CEO Watson AI Will Change Everything in Healthcare Radiologists Will Lose Jobs Soon. <https://www.youtube.com/watch?v=VqgkEqABBPQ>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Alonge, Adebayo: How AI Could Revolutionize Healthcare in Africa Long before the United States (2017) *Newsweek*. <http://www.newsweek.com/artificial-intelligence-us-healthcare-africa-693849>. Zugegriffen: 31. Dezember 2017

Apple Announces Solution Bringing Health Records to iPhone (2018) *Apple Newsroom*. <https://www.apple.com/newsroom/2018/01/apple-announces-effortless-solution-bringing-health-records-to-iphone/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

Artificial Intelligence Used To Detect Rare Leukemia Type In Japan (2016) *NDTV*. <https://www.ndtv.com/health/artificial-intelligence-used-to-detect-rare-leukemia-type-in-japan-1440789>. Zugegriffen: 29. Dezember 2017

Brauer, Wilfried: GI – 11. Jahrestagung. In Verbindung mit Third Conference of the European Co-operation in Informatics (ECI) München, 20.–23. Oktober 1981 Proceedings. *Informatik-Fachberichte*, Vol. 50 (1981) Springer, Berlin Heidelberg, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:1111-20130304214>. Zugegriffen: 29. Dezember 2017

Bresnick, Jennifer: HealthITAnalytics, How Do Artificial Intelligence, Machine Learning Differ in Healthcare? (2017) *HealthITAnalytics*. <https://healthitanalytics.com/features/how-do-artificial-intelligence-machine-learning-differ-in-healthcare>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Cellan-Jones, Rory: Hawking. AI Could End Human Race (2014) *BBC News*, 2 December 2014, section Technology. <http://www.bbc.com/news/technology-30290540>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Chapman, Matthew: A Health App's AI Took on Human Doctors to Triage Patients (2016) *Motherboard*. https://motherboard.vice.com/en_us/article/z43354/a-health-apps-ai-took-on-human-doctors-to-triage-patients. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Chin, Lynda, Satell, Greg: How Physicians Can Keep Up with the Knowledge Explosion in Medicine (2016) *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2016/12/how-physicians-can-keep-up-with-the-knowledge-explosion-in-medicine>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Davenport, Thomas H., Ronanki, Rajeev: Artificial Intelligence for the Real World (2018) *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2018/01/artificial-intelligence-for-the-real-world>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Dickson, Ben: How Artificial Intelligence Is Revolutionizing Healthcare (2017) *The Next Web*. <https://thenextweb.com/artificial-intelligence/2017/04/13/artificial-intelligence-revolutionizing-healthcare/>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Engadget: IBM's Watson Supercomputer Destroys Humans in Jeopardy (2011) https://www.youtube.com/watch?v=WFR3lOm_xhE. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Esteva, Andre et al: Dermatologist-Level Classification of Skin Cancer with Deep Neural Networks (2017) *Nature*, 542.7639, 115 <https://doi.org/10.1038/nature21056>

GeoBeats News, Stephen Hawking Says Artificial Intelligence Is A Threat To Human Existence (2014) <https://www.youtube.com/watch?v=bv7HxfuKLxI>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Gibbs, Samuel: Elon Musk. AI ,vastly More Risky than North Korea' (2017) *The Guardian*, 14 August 2017, section Technology <http://www.theguardian.com/technology/2017/aug/14/elon-musk-ai-vastly-more-risky-north-korea>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Health A-Z, *Your.MD*. <https://www.your.md/atoz/>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Hernandez, Daniela: Artificial Intelligence Is Now Telling Doctors How to Treat You (2014) *WIRED*. <https://www.wired.com/2014/06/ai-healthcare/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

IBM Watson: IBM Watson Health and the Future of Healthcare (2015) <https://www.youtube.com/watch?v=jeCgQ5XruY&feature=youtu.be>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Jarrett, Cosette: Canada Is Exploring Using AI to Help Prevent Suicide (2018) *VentureBeat*. <https://venturebeat.com/2018/01/06/canada-is-exploring-using-ai-to-help-prevent-suicide/>. Zugegriffen: 5. März 2018

Kite-Powell, Jennifer: See How Artificial Intelligence Can Improve Medical Diagnosis And Healthcare (2017) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2017/05/16/see-how-artificial-intelligence-can-improve-medical-diagnosis-and-healthcare/#49ce2f386223>. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Lupton, Deborah: Beyond Techno-Utopia. Critical Approaches to Digital Health Technologies (2014) *Societies*, 4.4, 706–11. <https://doi.org/10.3390/soc4040706>

Marr, Bernard: What Is The Difference Between Artificial Intelligence And Machine Learning? (2016) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2016/12/06/what-is-the-difference-between-artificial-intelligence-and-machine-learning/>. Zugegriffen: 31. Dezember 2017

Miliard, Mike: Healthcare AI Poised for Explosive Growth, Big Cost Savings (2017) *Healthcare IT News*. <http://www.healthcareitnews.com/news/healthcare-ai-poised-explosive-growth-big-cost-savings>. Zugegriffen: 31. Dezember 2017

Modernizing Medicine, iPad-Based Electronic Medical Record (EMR) Systems, *Modernizing Medicine*. <https://www.mod-med.com/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Moor, James: The Dartmouth College Artificial Intelligence Conference. The Next Fifty Years (2006) *AI Magazine*, 27.4, 87–91

Semigran, Hannah L., Levine, David M., Nundy, Shantanu, Mehrotra, Ateev: Comparison of Physician and Computer Diagnostic Accuracy (2016) *JAMA Internal Medicine*, 176.12, 1860–61. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2016.6001>

Shift Technology (2018) <https://www.shift-technology.com/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Solon, Olivia: Robots Will Eliminate 6% of All US Jobs by 2021, Report Says (2016) *The Guardian*, 14. September 2016, section Technology. <http://www.theguardian.com/technology/2016/sep/13/artificial-intelligence-robots-threaten-jobs-forrester-report>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Susskind, Richard, Susskind, Daniel: Technology Will Replace Many Doctors, Lawyers, and Other Professionals (2016) *Harvard Business Review* <https://hbr.org/2016/10/robots-will-replace-doctors-lawyers-and-other-professionals>.

Zugegriffen: 2. Januar 2018

Szolovits, Peter: Artificial Intelligence in Medicine (1982) *AAAS Selected Symposium, 51*. Westview Press for the American Association for the Advancement of Science, Boulder, Colorado

Vize, Richard: Technology Could Redefine Doctor-Patient Relationship (2017) *The Guardian*, 11 March 2017, section Healthcare Professionals Network. <http://www.theguardian.com/healthcare-network/2017/mar/11/artificial-intelligence-nhs-doctor-patient-relationship>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Wikipedia: Machine Learning (2017) https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Machine_learning&oldid=817402244. Zugegriffen: 1. Januar 2018

Yu, Jea: Insurance Fraud Prevention Gets Help From Artificial Intelligence (2017) *Samsung Business Insights*. <https://insights.samsung.com/2017/06/06/insurance-fraud-prevention-gets-a-little-help-from-artificial-intelligence/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018



4

Internet of Things (IoT) im Gesundheitswesen

Fast täglich kann man den Medien Berichte über neue Geräte vernehmen, die unser Leben vereinfachen und beleben sollen. Amazon und Google bringen ihre intelligenten Lautsprechersysteme *Echo* und *Home*, Nokia bewegt sich hin zu Smart Wearables, mit der Google-Übernahme *Nest* wartet man mit smarten Lösungen auf, die Heizsysteme je nach den Gewohnheiten der Bewohner automatisch regulieren. Der intelligente Kühlschrank von Samsung, der Essen eigenständig nachbestellt, gilt schon lange als Synonym für einen wichtigen Wandel. Das Internet der Dinge verwandelt nahezu alle Gegenstände des täglichen Lebens in netzwerkfähige Geräte, die untereinander kommunizieren, Daten austauschen und sich aus der Ferne steuern und überwachen lassen.

4.1 Was ist das Internet der Dinge eigentlich?

Für Fans von Science-Fiction-Filmen und -Serien sind die allgegenwärtige Präsenz des Computers und die verschiedenen Zugriffs- und Kommunikationsmöglichkeiten nichts Neues. Wenn Leonard Nimoy, alias Mr. Spock, den Board-Computer im Dialog bittet, ihm Informationen über einen fremden Stern zu liefern oder die letzten Ziffern von Pi zu berechnen, dann sind das Anwendungsbeispiele, wie wir sie bald auch im Alltag und im medizinischen Bereich finden werden. Der Bordcomputer des Raumschiffs Enterprise diente übrigens als Vorbild für Amazon Echo. Auch das von Dietmar Schönherr geführte Raumschiff Orion, die Mutter aller Raumschiffe, das seit Mitte der 1960er-Jahre über deutsche Fernseher flimmert, besaß bereits ähnliche Kommunikations- und Steuerwerkzeuge – allerdings mit einer rudimentären Funktionalität. Was für Gene Roddenberry und andere als notwendige Ausrüstungsgegenstände der Zukunft betrachtet wurde, wird peu à peu im 21. Jahrhundert Realität – und zwar in allen Lebenslagen und damit auch im Gesundheitswesen.

Das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) ist zweifelsohne einer der am häufigsten verwendeten Hype-Begriffe der letzten Jahre. Man kann es allgemein als die umfassende Vernetzung von Objekten beliebiger Art verstehen, die über das Internet miteinander kommunizieren.

Der Begriff bzw. das Konzept des Internets der Dinge wird zwei Persönlichkeiten zugeschrieben: Mark Weiser und Kevin Ashton. Der 1999 verstorbene

US-amerikanische Computerwissenschaftler und Leiter des Palo Alto Research Centers Weiser sprach 1988 vom *ubiquitous computer* (Weiser 1991). Dahinter verbirgt sich die Theorie des allgegenwärtigen Computers. 1991 konkretisierte Weiser seine Vision in dem Aufsatz *The Computer for the 21st Century*. Weiser betrachtet das Internet der Dinge als die Verknüpfung von eindeutig identifizierbaren physischen Objekten (engl. *things*) mit einer virtuellen Repräsentation in einer internetähnlichen Struktur.

Das Internet besteht nun also nicht mehr nur aus menschlichen Teilnehmern, sondern auch aus Dingen. Kevin Ashton war wohl 1999 der Erste, der den Begriff *Internet of Things* in einer wissenschaftlichen Publikation verwendete¹. Der Brite ist Mitbegründer des Auto-ID Centers am Massachusetts Institute of Technology, das maßgeblich an der Entwicklung von RFID und weiteren Sensor-Technologien beteiligt war. RFID ist eine Technologie für Sender-Empfänger-Systeme, die dem automatischen und berührungslosen Identifizieren und Lokalisieren von Objekten dient. Sie wird beispielsweise in der Baubranche, in der Müllentsorgung und beim Waren- und Bestandsmanagement eingesetzt.

Seit diesen beiden Pionieren hat sich viel getan. Getrieben durch Fortschritte in den drahtlosen Übertragungstechniken, gepaart mit Cloud Computing und KI, ist IoT zu einem vielversprechenden Innovationstreiber geworden.

¹Wikipedia: Kevin Ashton (2017) https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kevin_Ashton&oldid=166371937. Zugegriffen: 11. Februar 2018.

4.2 Das Schichtenmodell als Grundlage des IoT

Um das Internet der Dinge und sein Potenzial im Allgemeinen und dessen Einsatz im Gesundheitswesen im Besonderen besser beurteilen zu können, lohnt ein Blick auf die verschiedenen aufeinander aufbauenden Schichten der IoT-Architektur².

Auf der untersten Ebene ist die *Sensor-Schicht* angesiedelt, d. h. das eigentliche Gerät. Die Fühler liefern Daten für die Echtzeitverarbeitung. Diese Sensoren zeichnen beispielsweise die Luftqualität, die Raumtemperatur, Bewegungen, den Puls etc. auf. Meist verfügen diese Sensoren auch über kleine Speicher, damit sie die ersten Messdaten vor der Übergabe bzw. dem Auslesen sichern können. Häufig wird der Datentransfer über Bluetooth-Verbindungen realisiert.

Es folgt die *Netzwerkebene*, über die Daten von Sensoren und Messgeräten übermittelt werden, die ein hohes Datenvolumen produzieren. Diese Schicht kann man sich – unabhängig von der Art der praktischen und technischen Implementierung – als privates Netzwerk vorstellen, über das die gesammelten Daten in speziellen medizinischen Applikationen landen.

Die dritte Schicht ist die *Cloud* respektive die *IoT-Platform*. Diese erfüllt üblicherweise verschiedene

²Praxisleitfaden Internet der Dinge. IoT-Technologie (2017) *Digitales Wirtschaftswunder.de*. <https://digitales-wirtschaftswunder.de/praxisleitfaden-internet-der-dinge-teil-3-iot-technologie/> Zugriffen: 11. Februar 2018.

Managementaufgaben. Die Verarbeitungsschicht ist verantwortlich für die Sammlung, Aufbereitung, Weiterbearbeitung und Speicherung der Daten aus der Sensor- respektive Geräteschicht. Ein wesentliches Element dieser Schicht ist außerdem die Echtzeitanalyse, die der unmittelbaren Auswertung der eingehenden Informationen dient. Auch die Filterung und Abstraktionen sind Aufgaben dieser Schicht.

Die vierte Schicht ist die *Applikations-Schicht*. Diese können Sie sich als Benutzeroberfläche für die darunterliegenden Funktionen vorstellen. Es ist im Wesentlichen eine Mensch-Maschine-Schnittstelle. Hier werden die aufbereiteten Daten für Auswertungen, Darstellungen oder Entscheidungen gebraucht.

Eine der zentralen und gleichzeitig die komplexeste Herausforderung von IoT-Umgebungen ist die Lösung von Sicherheitsfragen und -problemen. Sicherheit bedeutet in erster Linie Datensicherheit und Datenintegrität. Die *Security-Schicht* muss also Mechanismen bereitstellen, die Daten vor unerwünschten Zugriffen und vor Manipulationen schützt. Sie läuft parallel zu den anderen vier Schichten. In diesem Bereich profitiert das Internet der Dinge von etablierten Sicherheitsmechanismen. Allerdings sind mögliche Angriffspunkte mit denen herkömmlicher internetbasierter Applikationen identisch. Für einen Hacker macht es somit keinen Unterschied, ob er einen Webserver oder eine IoT-Healthcare-Umgebung angreift.

Der IoT-Mainstream wird durch effiziente drahtlose Protokolle und günstige Low-Power-Mikroprozessoren bestimmt. Man geht heute davon aus, dass die Zahl der Geräte, die das Internet nutzen, bis 2020 den Wert

50 Mrd. überschreiten. Diese gewaltige Zahl wird nicht ohne Folgen auf das gesamte Netzwerk bleiben. Einen erheblichen Anteil an dieser Entwicklung werden Geräte haben, die der medizinischen Versorgung dienen. Damit ein zeitgemäßes Gesundheitswesen Teil des Internets der Dinge sein kann, muss eine flexible, skalierbare und vor allem sichere Infrastruktur geschaffen werden.

Bei der Diskussion um den Einsatz von Internet-technologien im Medizinbereich begegnet man immer häufiger dem Begriff des *Medical Body Area Network*, kurz MBAN. Dieses Akronym wurde nicht von anonymen Marketingabteilungen oder der Politik entwickelt, sondern entstammt der fachkundigen Diskussion von Wissenschaftlern und Praktikern. Dabei handelt es sich um ein Netzwerk, über das Geräte kommunizieren, die am menschlichen Körper getragen werden, und Daten mit zentralen Steuer- und Überwachungsgeräten austauschen, die sich nicht in Körernähe befinden. Die primäre Aufgabe solcher Netzwerke ist die Aufzeichnung und Messung von Körperfunktionen/-parametern des Patienten. Doch MBAN unterliegen zwei Einschränkungen: Zum einen müssen die Patienten durch Profis angelernt werden, zum anderen taugt diese Technik nur für diagnostische und therapeutische Zwecke.

4.3 Vernetzte Gesundheit und Gesundheitswesen

Experten sind sich heute einig darin, dass die Integration von IoT-Technologien in das Gesundheitswesen und in medizintechnische Geräte die Qualität und die Effektivität medizinischer Dienstleistungen deutlich erhöhen werden.

Verschiedene Faktoren werden die Verankerung von IoT als Grundpfeiler des Gesundheitssystems beschleunigen:

- Steigende Kosten im Gesundheitswesen,
- Patienten und Konsumenten wachsen mit Technologie auf,
- allgegenwärtige digitale Infrastruktur.

Diese drei Faktoren bereiten den Nährboden für den Erfolg des IoT. Ineffizienzen im Gesundheitssystem können durch bessere Transparenz gesenkt werden, vor allem im Klinikbereich. Daten aus dem Alltag der Patienten und Konsumenten können aufzeigen, welche Interventionen wirken und welche nicht. Präventive Maßnahmen können besser gesteuert werden. Und das digitale Umfeld mit günstigen Cloud-Lösungen, schlauer werdender künstlicher Intelligenz und Konsumenten, welche sich an *Wearables* gewöhnen, ist ideal.

Das zukünftige Einsatzgebiet von IoT im Gesundheitswesen ist unglaublich breit. Es ist unmöglich, alle

Anwendungen aufzuzählen. Wir fokussieren uns im Folgenden auf zwei Kategorien:

- IoT für Effizienz- und Qualitätssteigerung,
- IoT für biometrisches Monitoring.

4.4 IoT für Effizienz und Qualität im klinischen Umfeld

Lange Wartezeiten in Kliniken sind Alltag. Patienten warten auf die Notfallaufnahme. Dann warten sie auf die radiologische Untersuchung. Dann auf das Gespräch mit dem Arzt. Und schließlich darauf, dass ein Bett für sie auf der Station bereit ist. Das System ist leider nicht effizient. Die kleinsten Abweichungen, z. B. wenn jemand ausfällt, verursachen größte Engpässe. Indoor Positioning Analytics (IPA) hilft, diese Abläufe und Engpässe visuell darzustellen und wo nötig Maßnahmen zu treffen³. Mittlerweile sind Betten oder Rollstühle mit RFID-Tags versehen. So weiß die Pflege jederzeit, wo die Patienten sind. Nicht selten suchen Krankenschwestern Patienten, weil eine Untersuchung ansteht. In der Regel muss dafür das Krankenhaus abgeklappert werden, bis die Patienten schließlich im Café oder draußen beim Rauchen gefunden werden. Die über IPA gesammelten Daten können aber über die Zeit helfen, Abläufe besser darzustellen,

³Healthcare News and Insights: How to Get the Most out of IoT in Your Hospital (2017) <http://www.healthcarebusinesstech.com/iot-hospital/>. Zugegriffen: 12. Februar 2018.

zu optimieren und damit häufig auch die Sicherheit für die Patienten zu verbessern. Z. B. wenn Personal in der Notfallaufnahme fehlt, kann dies aus nicht kritischen Bereichen der Klinik abgezogen und umverteilt werden.

Einen großen Gewinn stellt die Technik bei Krankentransporten dar, und zwar nicht nur innerhalb von Krankenhäusern, sondern auch bei Rettungswagen, Hubschraubern und bei der Verlegung. In derlei Szenarien können Sensoren wichtige Parameter überwachen und gegebenenfalls die nächsten Behandlungsschritte vorbereiten, für die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen sorgen und das Erstellen der Dokumentation automatisieren.

Bettenbelegung ist ein weiteres Problem. Patienten müssen teilweise lange in der Notfallaufnahme warten, bis ein Bett für sie frei wird. Nun kann mittels IoT in Echtzeit angezeigt werden, wann ein Bett frei wird und so die Auslastung maximiert, respektive die Wartezeit minimiert, werden. Dies könnte sogar auf der Ebene eines Klinikverbundes oder bei der Sanitätsleitstelle erfolgen. So würde eine Ambulanz immer wissen, welche Kliniken welche Kapazität haben und diese primär ansteuern.

Auch Diagnostikgeräte (Röntgen, Computertomogramm etc.) sind mittlerweile an das Internet angeschlossen. So kann z. B. Philips Geräte drahtlos überwachen und vorzeitig mittels *E-Alert-System* Wartungs- und Reparaturarbeiten einleiten, bevor ein Gerät stillsteht⁴. Der Ausfall eines Gerätes kommt häufig einem Desaster gleich, vor allem, wenn es

⁴Philips e-Alert Alarmlösung für MR-Systeme HC895000. Philips <https://www.philips.ch/healthcare/product/HC895000/phillips-ealert-alerting-solution-for-mri-systems>. Zugegriffen: 25. Februar 2018.

sich um das einzige Gerät in der Klinik handelt. Das System der antizipierten Wartung nennt sich *predictive maintenance* und erlaubt es mittlerweile Klinken, die Geräte viel besser auszulasten und damit kosteneffizienter zu werden.

Im klinischen Bereich eröffnen sich neben der Überwachung von Patienten und deren Zuständen weitere Anwendungsmöglichkeiten, die auf den ersten Blick nicht erkennbar sind. So kann beispielsweise OP-Gut überwacht werden. Nach jeder OP kann digital ermittelt werden, ob auch alle Objekte aus dem Patienten entfernt wurden. Auch die Überwachung und das Lokalisieren von Beständen ist möglich. Sobald ein Teil fehlt, wird es automatisch nachbestellt und geliefert. Im Orthopädiebereich ist dies heute bereits Realität.

Der Bereich dieser nicht patientenbezogenen Prozesse bei der Anwendung von IoT-Techniken wird in den Medien weit weniger gefeiert, spielt aber dennoch eine wichtige Rolle. Dieser medial unterrepräsentierte Markt kann grundsätzlich in zwei Anwendungsbereiche unterteilt werden: den logistischen und den servicebezogenen Bereich. Im Rahmen der Logistik kann IoT zur automatisierten Nachbestellung von Medikamenten und anderen Ge- und Verbrauchsgütern verwendet werden. Krankenhäuser können beispielsweise über Unique Device Identification (UDI) Produkte und Verpackungen bestimmen, deren Warenein- und -ausgang automatisch erfasst werden. Es können notwendige Lagermengen und Puffer definiert werden. Alles andere überlässt man

intelligenter IoT-Technik. Der Einsatz von intelligenten Lösungen kann außerdem helfen, z. B. Fehler bei der Nachbestellung zu vermeiden, Bestände und damit die Kapitalbindung zu reduzieren sowie das Ablaufen von Produkten zu vermeiden. Schon heute hofft man in vielen Krankenhäusern auf intelligente Supply Chain-Management-Lösungen, die die Versorgung automatisieren und optimieren. Diese Prozesse betreffen alle Akteure im Gesundheitswesen; angefangen beim Hersteller, über die Krankenhäuser, Ärzte bis hin zu den Patienten. Daher ergeben sich hier enorme Potenziale für die Prozessoptimierung, aber auch für die Entstehung neuer Geschäftsmodelle.

Dem Trend hin zu einer engen Vernetzung aller gesundheitstechnischen Geräte folgend ist davon auszugehen, dass in naher Zukunft alle neuen Medizingeräte IoT-fähig sein werden. Für die Hersteller und deren Techniker eröffnen sich damit ganz neue Möglichkeiten. Sie können Geräte aus der Ferne warten, mit speziellen Monitoring-Lösungen die Funktionstüchtigkeit sicherstellen und bei Bedarf Updates aufspielen. Damit lassen sich die Wartungskosten deutlich reduzieren. Hersteller und Anwender (Praxen, Krankenhäuser etc.) erhalten außerdem ein exaktes Bild der tatsächlichen Nutzung und Nutzungsdauer. Bei vernetzten Medizinprodukten kann man auch die Wartung in jeder Hinsicht optimieren, denn Wartungsaufgaben werden weitgehend vorhersagbar.

4.5 IoT für biometrisches Monitoring

Unter diese Überschrift fällt eine Fülle von IoT-Anwendungen, welche Daten des Körpers, wie z. B. Bewegung, Temperatur sowie Herzaktivität messen und meist übers Netz an die Cloud schicken.

Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit sollen hier einige Beispiele das enorme Potenzial zeigen. Als einer der wichtigsten Anwendungsbereiche gilt die Herzfrequenzüberwachung, bei der die Biometrie jedes Patienten mit bestimmten Schwellenwerten überwacht wird. Das Monitoring-System zeichnet die EKG-Herzfrequenz-Variabilität und Zuverlässigkeit, die Atmungsrate, das Aktivitätsniveau des Herzens und die Körperposition (stehend, sitzend, liegend) auf. Außerdem können Vitalzeichen wie das Gewicht und der Blutdruck aus der Ferne überwacht werden.

Die Überwachung von Herzrhythmusstörung gilt als eine weitere wichtige klinische Anwendung. Mithilfe von IoT-Techniken kann die Herzüberwachung zu Hause oder im Krankenhaus erfolgen. Generell können Patienten mit spezifischen Sensoren ausgestattet werden. Das erleichtert nicht nur die Überwachung relevanter Körperfunktionen, sondern vereinfacht auch die Lokalisierung und Verfolgung von Patienten. Diese Systeme können effizient in Notrufsysteme eingebettet werden. So lassen sich Reaktionszeiten in Notfällen deutlich reduzieren. Der Versand von Hilfebenachrichtigungen bei kritischen Ereignissen ist sicherlich ein erheblicher Gewinn für jeden Patienten. Wie jeder weiß, zählt bei Herzinfarkten und Schlaganfällen jede Sekunde. Gerade bei Risikopatienten

stellt eine permanente ortsungebundene Überwachung einen deutlichen Gewinn dar – so es denn vonseiten des Patienten gewünscht ist.

Außerdem können die IoT-basierten Sensoren helfen, einen Teil der Nachsorge im häuslichen Umfeld zu gestalten. Anstatt dass ein Patient zwei Wochen nach einer größeren OP in der Klinik bleibt, könnte er vorher entlassen werden. Zu Hause wird der Patient dann mit Sensoren überwacht. Das System misst, ob die Körpertemperatur als Zeichen eines Infektes steigt und ob sich der Patient genügend bewegt. Dies kann als indirektes Zeichen für Schmerzen gedeutet werden. Je nach Schmerzart bewegen sich Patienten entweder viel weniger oder bei Koliken viel mehr. Bei Abweichungen wird Alarm geschlagen.

Nicht nur in der operativen Nachsorge, sondern entlang der gesamten Wertschöpfungskette wird IoT unsere Gesundheitsversorgung beeinflussen.

Bei Patienten, welche mit akuten Beschwerden oder nach einer Operation nicht aufstehen dürfen, kann eine auf dem Bett platzierte Matte automatisch jemanden verständigen, sobald der Patient versucht, selbst aufzustehen. Eine Studie konnte zeigen, dass dadurch kostspielige Stürze fast vollumfänglich verhindert werden können⁵.

In der Rehabilitation von Schlaganfallpatienten gibt es nun sogar ein Pflaster, welches den Fortschritt der

⁵CTel News: IoT in Acute-Care Settings? (2017) Center for Telehealth and E-Health Law <http://ctel.org/2017/05/iot-in-acute-care-settings/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018.

Rehabilitation zu Hause misst und mitteilt (Holloway 2018). Dieses erfasst neben Puls und Bewegung auch Sprachmuster und die Fähigkeit zu schlucken. Die beiden letzteren Funktionen sind häufig Folgen eines Schlaganfalls. So kann frühzeitig eingegriffen werden, sollte der Fortschritt abflachen.

Und natürlich sehr wichtig und hilfreich sind die IoT-fähigen Geräte im Management und in der Überwachung von chronischen Krankheiten, wie z. B. Diabetes. So werden sich Diabetespatienten in Zukunft nicht mehr ständig selbst Insulin verabreichen müssen. Die Insulinverabreichung kann auch heute bereits teilautonom erfolgen. Spannend wird es, wenn die Daten des Patienten an z. B. einen Diabetes-Case-Manager oder eine Diabetes-Pflegefachkraft übertragen werden und diese die täglichen Schwankungen der Zuckerwerte im Blut im Detail studieren. Wenn dies dann noch mit Bewegungsdaten und Gewichtsdaten gekoppelt wird, kann die medizinische Fachkraft personalisierte Empfehlungen an die Patienten geben, damit diese gut *gecoacht* positiven Einfluss auf ihre Krankheit nehmen, alleine durch Verbesserung der täglichen Gewohnheiten.

Durch das Monitoring werden wir Konsumenten und Patienten auch selbst besser in der Lage sein, Entscheidungen zu unserer Gesundheit zu treffen. Heute tappen wir meist im Dunkeln. Es geht uns nicht gut. Wir sind matt. Aber ohne Arztbesuch ist die Ursache reine Spekulation. Vitamin-D-Mangel? Eine leichte Depression? Eisenmangel? Wir können es nur vermuten. Irgendwann werden wir Zugang zu genügend Daten haben, um uns direkt selbst ein Bild zu machen. Ja, dafür wird es auch

Laborwerte aus dem Blut brauchen. Aber ich denke auch dies werden wir in einigen Jahren zu Hause machen können. Ein Tropfen Blut auf ein Bluetooth-Device und unsere Uhr wird die wichtigsten Daten anzeigen. So werden wir irgendwann zu mündigen Managern unserer eigenen Gesundheit und die Ärzte werden sich auf eine andere Gruppe von Patienten fokussieren können. Jene, die nicht in der Lage sind ihre Gesundheit zu steuern, jene die das persönliche Gespräch brauchen, und jene mit schwerwiegenden oder nicht eindeutig zuzuordnenden Erkrankungen. Die Schnupfen-, Kopfschmerz-, Allergie- und Prädiabetes-Patienten werden der Vergangenheit angehören.

Das Gebiet der IoT-fähigen Geräte für das Messen von biomedizinischen Daten wächst rasant und wir sehen spannende Firmen und Produkte. Scanadu aus Kalifornien z. B. arbeitet an Urinteststreifen, welche Resultate auf dem Smart Home zu Hause darstellen werden. Der Test befindet sich aktuell in der Zulassungsphase⁶.

Thalmiclabs geht einen ebenfalls spannenden Weg⁷. Ihr Myo-Armband kann mittels Gesten oder Armbewegung Computer steuern. So können Menschen mit Amputation ihre Prothesen steuern. Aber das Myo-Band kann auch genutzt werden, um Computer generell zu steuern.

⁶Scanadu Diagnostics. <https://www.scanadu.com/diagnostics.html>. Zugegriffen: 21. Februar 2018.

⁷Thalmic Labs, Makers of the Myo Gesture Control Armband. <https://www.thalmic.com/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018.

Auch im Kinder- und Babybereich gibt es erst Produkte auf dem Markt. Owletcare bietet ein kleines Gerät an, welches kontinuierlich Herzschlag und Blutsauerstoffsättigung misst⁸. So wissen Eltern jederzeit, ob ihr Kind atmet und es ihm gut geht. Vor allem zur Vorbeugung des plötzlichen Kindstodes ist dies eine gute Ansatz.

Auch für die Messung von Gehirnaktivität gibt es erste Sensoren. So kann *Muse* helfen, schneller in die richtige Meditation zu kommen⁹. Mittels Feedback erfährt man, ob man „richtig“ meditiert. Damit wird das Ganze einfacher und effektiver. Über die Zeit wird es so möglich sein, aktiv zu lernen Gehirnzustände herzustellen, die sonst nur nach langjährigem Training erreicht werden konnten.

Die permanente Überwachung von biomedizinischen und physischen Parametern ohne enorme Kosten ist eine wichtige Erweiterung für das Gesundheitswesen. Das Rund-um-die-Uhr-Monitoring hilft außerdem, die Patienten für ihren eigenen Zustand und Änderungen zu sensibilisieren. Die flächendeckende Verfügbarkeit von WLAN-Zugangsknoten macht die Datenübertragung einfach – zumindest in den Industrienationen und überall dort, wo eine geeignete Infrastruktur verfügbar ist.

Nur ein Teil der verfügbaren biometrischen Sensoren fällt in die Kategorie *clinical grade*. Diese Sensoren wurden in klinischen Tests ausgiebig auf ihre Zuverlässigkeit und

⁸Smart Sock 2, *Owlet Baby Care*. <https://owletcare.com/products/owlet-smart-sock>. Zugegriffen: 21. Februar 2018.

⁹MUSE™, *Meditation Made Easy*. <http://www.choosemuse.com/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018.

Genauigkeit getestet. Somit können sie in lebenswichtigen Situationen oder in der klinischen Forschung zum Einsatz kommen (was in der Regel ein Unterschied zu der Fitness-trackern ist, mit Ausnahme der Apple Watch). Spannend ist ihre Anwendung neben den oben beschriebenen Beispielen auch im Zusammenhang mit der Medikamentenentwicklung. So können klinische Studien erweitert durch digitale Daten bessere Einblicke geben, über die Wirkung auf Patienten im normalen Alltag, d. h. außerhalb der strikt kontrollierten Umgebung. Dort sind die Daten zwar nicht gleichermaßen exakt wie in einer klinischen Studie in einem kontrollierten Umfeld, dafür aber viel repräsentativer. Damit werden die Ergebnisse relevanter für Zulassungsbehörden und in Preisverhandlungen mit Kassen.

Viele der oben beschriebenen Sensoren können drahtlos am Körper getragen werden. Die Wearables und die damit verbundenen Konzepte und Möglichkeiten sind der medienwirksamste Teil der Entwicklung und Verbreitung von IoT-Technologien. Sonys Walkman gilt als die Mutter aller Wearables, wenngleich die modernen Geräte dem 1979 eingeführten mobilen Kassettenrecorder um Meilen voraus sind. Unterschiedliche Prognosen sagen übereinstimmend voraus, dass die Zahl der mobilen, körpernahen Computersysteme in den kommenden Jahren weiter rasant wachsen wird. Dabei schwirren je nach Quellen Zahlen von 110 bis 150 Mio. Geräte weltweit durch den Raum. Ihnen allen ist weitgehend gemein, dass auch sie die Internettechnologie nutzen und Daten mit bestimmten Systemen austauschen können. Man spricht in diesem Konzept auch vom *Wearable Internet of Things* (WIoT). In Verbindung mit Cloud-Services lässt sich die

Performance deutlich steigern, weil Daten direkt weitergeleitet werden können.

Mittlerweile gibt es Dutzende davon. Einige dienen nur als Fitnesstracker, andere sind Teil einer Smart-Uhr wie der Apple Watch. Diese wird mittlerweile sogar in einer klinischen Studie getestet, ob sie Herzrhythmusstörungen präzise und rechtzeitig erkennen kann¹⁰. Dafür brauchte es früher unförmige Geräte mit Dutzenden Kabeln, welche über mehrere Tage getragen werden mussten. Heute kann das vielleicht bald unsere Uhr übernehmen. Viel mehr noch. Apple arbeitet daran, Apple Health Kit mit den elektronischen Krankenakten zu verbinden. Dann könnten all die Daten aus dem Alltag in die Krankenakte fließen oder in die andere Richtung. Damit könnte Apple Health Kit die wichtigste Informationsquelle werden. Nicht die Krankenakte¹¹.

Nicht zu vergessen ist die Tatsache, dass IoT auch die Kommunikation unter den einzelnen Geräten ermöglichen soll. So wird sich in Zukunft Alexa mit dem Kühlschrank, der Beleuchtung oder dem Fernseher austauschen. Doch was bringt diese Technologie für die Gesundheitsversorgung? Ich kann mir vorstellen, dass beispielsweise die Altersversorgung davon profitieren

¹⁰Apple Heart Study Launches to Identify Irregular Heart Rhythms (2017) *Apple Newsroom*. <https://www.apple.com/newsroom/2017/11/apple-heart-study-launches-to-identify-irregular-heart-rhythms/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018.

¹¹Apple Announces Solution Bringing Health Records to iPhone (2018) *Apple Newsroom* <https://www.apple.com/newsroom/2018/01/apple-announces-easy-fortress-solution-bringing-health-records-to-iPhone/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018 „Apple Announces Solution Bringing Health Records to iPhone“.

kann. Heute häufig kaum bezahlbar, werden in Zukunft Altenpfleger nicht mehr in gleichem Maße benötigt. „Smarte“ Wohnungen, ausgestattet mit Sensoren, ob der Bewohner genug mobil ist oder etwas braucht, werden einen Teil der Routineaufgaben selbst übernehmen. So könnte dort tatsächlich der Kühlschrank die wichtigsten Lebensmittel nachbestellen, Bewegungssensoren könnten mit auswärtigen Pflegemanagern verbunden sein und die Wohnung könnte sich gemäß den Gewohnheiten der Bewohner selbst steuern. Das kann Licht, Musik, Unterhaltung, Sichtschutz etc. betreffen, häufig Dinge, die älteren Patienten mit einer Einschränkung schwerfallen. Zusätzlich zum besseren Komfort, wird natürlich auch die Sicherheit für die Bewohner erhöht. Heute haben sie im besten Fall einen Alarmknopf am Handgelenk. Das heißt, Hilfe kommt nur im Ausnahmefall. In Zukunft wird dies auch präventiv erfolgen. So könnte eine Pflegefachkraft gerufen werden, wenn das System meldet, dass der Bewohner länger einsam war. Oder das System könnte die Familie benachrichtigen, dass ein Besuch an der Zeit wäre. Im Endeffekt wäre es der größte Zugewinn, dass alle Menschen im Alter länger zu Hause wohnen bleiben könnten, anstatt in ein Pflegeheim zu gehen. Mit IoT kann die Sicherheit relativ einfach verbessert werden. Außerdem werden die sprachbasierten persönlichen Assistenten nicht nur den Alltag durch Sprachsteuerung erleichtern, sondern auch als Gesprächspartner die Langeweile vertreiben. Irgendwann wird die KI in der Lage sein, ein unterhaltsames Gespräch zu führen, individuell abgestimmt auf den Gesprächspartner.

Vielleicht werden durch IoT lange Warteschlangen in Arztpraxen, Notaufnahmen und Kliniken bald der Vergangenheit angehören. Die Patientenüberwachung, die Verarbeitung und die Kommunikation von biomedizinischen Daten könnte nicht nur die Behandlung vereinfachen, sondern bietet auch erhebliches Kostenenkungspotenzial durch frühzeitige Interventionsmöglichkeiten bevor Komplikationen auftreten oder in der Prävention ganz generell. Somit könnte das Gesundheitswesen tatsächlich wörtlich zu „Health Care“ werden anstatt wie heute „Sick Care“.

Man kann die Anwendungsmöglichkeiten weiter auf die Spitze treiben. So ließen sich mithilfe von IoT-Technologien zahlreiche neue Geschäftsmodelle für das Versicherungswesen entwickeln. Beispielsweise ließen sich spezielle Tarife für Versicherte schaffen, die einen gesundheitsbewussten Lebensstil pflegen. Sensoren an der Kleidung, in der Zahnbürste, am Arbeitsplatz etc. könnten die notwendige Datenbasis liefern. Voranstehende Beispiele lassen erahnen, wie vielfältig die Anwendungsmöglichkeiten von IoT im Gesundheitswesen sind. Das kommerzielle Potenzial der Technik darf ohne Übertreibung als gigantisch bezeichnet werden, denn die Möglichkeiten, die wir heute sehen, sind sicherlich erst die Vorboten eines grundlegenden Paradigmenwechsels. Für die konkrete Entwicklung, Implementierung und Realisierung bedarf es kluger Köpfe, die von Medizin und der Internettechnologie etwas verstehen.

4.6 Probleme und Herausforderungen

Spricht man über das Internet der Dinge, so spricht man auch über Sicherheitslücken der Geräte und mögliche Angriffspunkte, die ein Eindringen, ein Abgreifen und sogar die Manipulation der Daten ermöglichen. Die Vernetzung von Produktionsanlagen, Smartwatches, Wearables wie Fitness-Armbändern sowie anderen Smart-Devices und intelligenten Maschinen macht Geräte im Privaten genauso anfällig wie in Firmennetzwerken. Allerdings wird die Einführung von IPv6 (Internet Protocol Version 6) manche Probleme der aktuellen Protokollversion IPv4 lösen. So stellt IPv6 deutlich mehr IP-Adressen zur Verfügung (die gehen dem aktuellen Protokoll bald aus). Das ist insofern von großer Bedeutung, weil jedes Gerät und jeder Sensor eine weltweit individuelle Adresse benötigt. Außerdem bietet IPv6 in Verbindung mit IPsec deutlich mehr Sicherheit.

Bei aller Euphorie für die Möglichkeiten, die neue Technologien bieten, ist auch eine kritische Auseinandersetzung mit der Thematik gefragt. Der bluetoothfähige Schwangerschaftstest ist längst Realität. Diese Daten können einfach von Drittgeräten ausgelesen werden. Und natürlich geht diese Information außer den beiden Betroffenen niemanden etwas an. Doch eben diese bluetoothfähigen Geräte sind leicht zu haken.

Schon heute lässt sich in etwa abschätzen, wohin die Reise in Sachen IoT gehen wird. Das Consulting-Unternehmen SRI Consulting Business Intelligence

hat zwei Trends ausgemacht¹². In der nächsten Entwicklungsstufe werden Teleoperation und Telepräsenz die Überwachung und Steuerung von entfernten Objekten erlauben. Die Fusion von Software-Agenten und erweiterten (smarten) Sensoren wird sich daran anschließen. Das britische Telekommunikationsunternehmen Essential Telecommunications fokussiert in seiner Roadmap weniger den zeitlichen Ablauf als vielmehr die Anwendungsbereiche *vernetztes Leben und Arbeiten, vernetzte Industrien, vernetzte Städte, vernetzte Automobile* und *vernetzte/s Gesundheit/Gesundheitswesen*¹³. Außerdem arbeitet man die bestehenden und kommenden Schnittmengen heraus, beispielsweise die Schnittmenge Telemedizin und klinische Fernüberwachung an der Schnittstelle zwischen vernetzter Industrie und Gesundheitswesen.

In welcher Abfolge sich die Trends bewahrheiten, ist letztlich zweitrangig. Sicher ist, dass das Internet der Dinge uns enger vernetzen wird. Daraus ergeben sich eine Fülle von Vorteilen. Die größte niederländische Stadt Amsterdam arbeitet beispielsweise an IoT-basierten Lösungen, Stichwort Smart City (Angelidou 2015). Dabei sollen insbesondere die Bereiche Gesundheit und Gesundheitswesen eine wichtige Rolle spielen. Der Ansatz ist keineswegs selbstlos: Nur eine gesunde Bevölkerung kann langfristig zu einer positiven Stadtentwicklung führen.

¹²Disruptive Technologies Global Trends 2025, APPENDIX F: The Internet of Things. SRI Consulting Business Intelligence. <http://web2.vsevteme.ru/attachments/show?content=6799>. Zugegriffen: 25. Februar 2018.

¹³Internet of Things. Essential Telecommunications. <http://www.essential-telecoms.co.uk/internet-of-things>. Zugegriffen: 22. Februar 2018.

Das Kernproblem von IoT liegt heute weniger auf der funktionalen Seite, sondern vielmehr im Bereich der Sicherheit. Sicherheit ist dabei längst nicht gleich Sicherheit, sondern ein komplexes Konstrukt, bei dem die verschiedensten sicherheitsrelevanten Fragen eine Rolle spielen. Da es sich bei medizinischen und patientenspezifischen Daten um im hohen Maße schützenswerte Informationen handelt, sind besonders hohe Anforderungen an die Datensicherheit und Integrität zu stellen.

Wie komplex die Sicherheitsaspekte sind, zeigt ein Blick aus der Vogelperspektive auf das Internet der Dinge im medizinischen Bereich. Hier ergeben sich verschiedene Angriffspunkte und Problemfelder. Überall dort, wo Daten von A nach B übertragen werden, ergeben sich Schwachstellen, die von Hackern attackiert werden könnten. Besonders einfach ist das Attackieren von drahtlosen Übertragungspunkten, weil der Angreifer sich in diesem Szenario nicht in unmittelbarer Nähe des Objekts befinden muss.

Welche Gefahren diesbezüglich für jeden Einzelnen lauern, zeigt die Geschichte des früheren US-Vizepräsidenten Dick Cheney, der unter George Bush jun. einige Jahre die Geschicke seines Landes mitgestaltete. Cheney, in jungen Jahren ein starker Raucher, hat fünf Herzinfarkte hinter sich. Den ersten erlitt er bereits im Alter von 37 Jahren. Im Alter von 71 Jahren unterzog er sich schließlich einer Herztransplantation. Wie Cheney in einem Interview mit dem US-Sender CBS verriet, bereitete ihm zuvor der implantierte Herzschrittmacher und dessen Fernsteuerungsfunktion große Sorgen. Aus Angst vor einem terroristischen Anschlag ließ Cheney die drahtlose

Kommunikationsschnittstelle deaktivieren, damit über diese nicht ein tödlicher Infarkt ausgelöst werden könnte. Cheney hat eigenen Aussagen zufolge ein ähnliches Szenario in der TV-Serie *Homeland* gesehen¹⁴. Dort wird einem Politiker die Fernsteuerungsfunktion seines Herzschrittmachers zum Verhängnis: Sein Widersacher bemächtigt sich der Gerätesteuerung.

Dass Cheneys Bedenken nicht aus der Luft gegriffen sind, weiß jeder, der sich einmal mit Netzwerktechnologien beschäftigt hat. Das Internet der Dinge ist ein extrem anfälliges Gebilde, das jede Menge Angriffspunkte bietet. Besonders beliebt und einfach ist das Knacken von unzureichend geschützten drahtlosen Verbindungen. Bluetoothbasierte Verbindungen können selbst Nichttechniker nach wenigen Stunden Einarbeitung mitlesen – sofern sie denn das notwendige Werkzeug dafür besitzen. Selbst geschützte WLAN-Netzwerke kann man mit Penetration-Werkzeugen knacken. Sogenannte Penetration Testing-Distributionen wie Kali Linux enthalten die kompletten Werkzeuge, die man als Hacker benötigt, um sich Zugang zu IT-Systemen zu verschaffen. Dieser Werkzeugkasten steht kostenlos im Internet zum Download bereit. Längst existieren Bot-Netze auf IoT-Basis.

Sicherheit ist ein komplexes Thema mit vielen Facetten. Damit die Akteure im Gesundheitswesen IoT-Techniken bedenkenlos einsetzen können, muss vonseiten

¹⁴THR Staff: Dick Cheney Feared Real Life 'Homeland' Scenario in 2007 (2013) The Hollywood Reporter. <https://www.hollywoodreporter.com/news/dick-cheney-feared-real-life-649950>. Zugegriffen: 22. Februar 2018.

der Gerätehersteller sichergestellt werden, dass die Übertragung sicher und zuverlässig ist. Sie müssen verhindern, dass Patientendaten abgegriffen und manipuliert werden können. Die Netzwerktechnologie stellt hierfür die notwendigen Werkzeuge bereit. Die Nutzer müssen sich indes der Gefahren bewusst sein. Wie aktuelle Untersuchungen zeigen, hatten bei einem Test von acht Fitnesstrackern sieben bedenkliche Sicherheitslücken beim Hochladen der Daten vom Gerät (Jonjic-Beitter 2016). Nur Apple bestand den Test. Andere Untersuchungen führten zu ähnlichen Ergebnissen.

4.7 Ausblick in die Zukunft – völlige Transparenz?

Politik und Wirtschaft streben nach einem Gesundheitswesen, das bezahlbar, sozial und auf dem neuesten technischen Stand ist. Mit dem Internet der Dinge und seinen vielen Anwendungsmöglichkeiten könnte all das deutlich näher rücken. Wenn da nur nicht so manch unüberwindlich scheinende Hürden wären, die es zu nehmen gilt. Die Integration von IoT-Techniken in den Alltag von Patienten und Medizinern ist längst im vollen Gange. In Teilbereichen wird IoT heute bereits effektiv in bestehende Prozesse integriert und hilft, Dinge einfacher zu gestalten. Die Frage ist nicht mehr, ob das Internet der Dinge das Gesundheitswesen reformieren wird, sondern eher wie und wann. Technische Lösungen für die Herausforderungen existieren. Die größte Herausforderung darf

daher in der Gestaltung der Integrations- und Transformationsprozesse gesehen werden.

Das Gesundheitssystem der Zukunft wird auch dank IoT viel stärker präventiv eingreifen, durch kontinuierliches Überwachen einzelner Vitalparameter und smarte Algorithmen, welche im Hintergrund Abweichungen erkennen und Alarm schlagen. Kliniken werden Patienten viel früher entlassen können, ohne die Überwachung der Patienten zu kompromittieren. Eltern werden über Connected Stethoskope die Geräusche der Lungen ihrer Kinder direkt an den Pädiater senden, ohne jedes Mal in die Praxis zu gehen.

Die Zukunft des Gesundheitswesens wird stark geprägt werden durch die bereits beschriebenen Bausteine:

- IoT-fähige Geräte und Sensoren (in Zukunft auch Brillen),
- drahtlose und kontinuierliche Messung von Körperparametern (Gewicht, Blutdruck, Schlaf, Puls, Stress, Sprache, Körpertemperatur, etc.),
- Tracking des Verhaltens (Bewegung, sozialer Umgang, Geodaten, Sport),
- KI-basierte Analytik,
- persönliche Assistenten wie Siri,
- Coaches mit Telezugriff auf die Daten.

Aus dem Zusammenspiel dieser Bausteine werden neue Geschäftsmodelle entstehen. Schöne Beispiele wie LARK für die KI-gesteuerte Diabetesprävention durch eine virtuelle Krankenschwester gibt es bereits. Ich erwarte eine Explosion von Start-ups in den nächsten Jahren im

Gesundheitswesen. Wie in anderen Gebieten, herrscht heute Goldrauschstimmung. Nicht nur Mediziner, sondern alle möglichen Fachbereiche wollen die Medizin revolutionieren. Die Technologien werden vielleicht auch der Schlüssel sein, der uns hilft, nach Jahrhunderten der Symptombekämpfung tatsächlich den Schwerpunkt viel stärker in die Prävention durch Verhaltensänderung zu bewegen.

Die nächsten Jahre werden von neuen, aber nicht perfekt vernetzten Technologien bestimmt sein. Danach werden wir ein Gesundheitsuniversum erleben, in dem wir gar nicht mehr merken, wie wir „gesund gehalten“ werden, weil vieles automatisch geschieht. IoT wird Teil des Alltags werden. Persönliche Assistenten werden sich mit uns zu unserer Gesundheit unterhalten und uns coachen. Versicherungsmodelle werden differenziert jene belohnen, welche sich den neuen Gesundheitsmodellen öffnen. Es wird weniger Blindflug ohne Daten geben. Wir werden jedes Verhalten, jeden Schritt von uns kennen. Ob wir das wollen, hängt sehr stark damit zusammen, wer Zugang zu diesen sehr intimen Daten bekommt. Wahrscheinlich wird jeder von uns den Kompromiss zwischen besserer Gesundheit, niedrigeren Krankenkassenprämien und weniger Privatsphäre individuell bestimmen müssen. Doch das System wird ohne Frage mehr Daten von uns bekommen wollen, da dies der Schlüssel zu einem günstigeren Gesundheitswesen ist.

Quellen und Literatur

Angelidou, Margarita: Smart City Strategy. Amsterdam (the Netherlands) (2015) *URENIO Watch*. <http://www.urenio.org/2015/01/12/smart-city-strategy-amsterdam-netherlands/>. Zugegriffen: 22. Februar 2018

Apple Announces Solution Bringing Health Records to iPhone (2018) *Apple Newsroom* <https://www.apple.com/newsroom/2018/01/apple-announces-effortless-solution-bringing-health-records-to-iphone/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

Apple Heart Study Launches to Identify Irregular Heart Rhythms (2017) *Apple Newsroom*. <https://www.apple.com/newsroom/2017/11/apple-heart-study-launches-to-identify-irregular-heart-rhythms/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

CTel News: IoT in Acute-Care Settings? (2017) *Center for Tele-health and E-Health Law* <http://ctel.org/2017/05/iot-in-acute-care-settings/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

Disruptive Technologies Global Trends 2025, APPENDIX F: The Internet of Things. *SRI Consulting Business Intelligence*. <http://web2.vsevteme.ru/attachments/show?content=6799>. Zugegriffen: 25. Februar 2018

Healthcare News and Insights: How to Get the Most out of IoT in Your Hospital (2017) <http://www.healthcarebusinesstech.com/iot-hospital/>. Zugegriffen: 12. Februar 2018

Holloway, James: Stretchable Throat Sensor A ,game-Changer in Stroke Treatment (2018) *New Atlas*. Medical. <https://newatlas.com/stretchable-throat-stroke-sensor/53504/>. Zugegriffen: 22. February 2018

Internet of Things. *Essential Telecommunications*. <http://www.essential-telecoms.co.uk/internet-of-things>. Zugegriffen: 22. Februar 2018

Jonjic-Beitter, Andrea: Studie zu Fitness-Trackern: Sicherheitsmängel bei sieben von acht Anbietern (2016) netzpolitik.org.

<https://netzpolitik.org/2016/studie-zu-fitness-trackern-sicherheitsmaengel-bei-sieben-von-acht-anbietern/> Zugegriffen: 25. Februar 2018

MUSE™, Meditation Made Easy. <http://www.choosemuse.com/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

Philips e-Alert Alarmlösung für MR-Systeme HC895000. *Philips*. <https://www.philips.ch/healthcare/product/HC895000/philips-ealert-alerting-solution-for-mri-systems>. Zugegriffen: 25. Februar 2018

Praxisleitfaden Internet der Dinge. IoT-Technologie (2017) *Digitales Wirtschaftswunder.de*. <https://digitales-wirtschaftswunder.de/praxisleitfaden-internet-der-dinge-teil-3-iot-technologie/> Zugegriffen: 11. Februar 2018

Scanadu Diagnostics. <https://www.scanadu.com/diagnostics.html>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

Smart Sock 2, *Owlet Baby Care*. <https://owletcare.com/products/owlet-smart-sock>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

Thalmic Labs, Makers of the Myo Gesture Control Armband. <https://www.thalmic.com/>. Zugegriffen: 21. Februar 2018

THR Staff: Dick Cheney Feared Real Life ,Homeland‘ Scenario in 2007 (2013) The Hollywood Reporter. <https://www.hollywoodreporter.com/news/dick-cheney-feared-real-life-649950>. Zugegriffen: 22. Februar 2018

Weiser, Mark: The Computer fort he 21th Century (1991) Scientific Amercian, September 1991. <https://www.lri.fr/~mbl/Stanford/CS477/papers/Weiser-SciAm.pdf>. Zugegriffen: 11. Februar 2018

Wikipedia: Kevin Ashton (2017) https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kevin_Ashton&oldid=166371937. Zugegriffen: 11. Februar 2018



5

Blockchain und der Schutz unserer Privatsphäre

5.1 Technologie

2008 erschien eine Publikation mit dem Titel *purely peer-to-peer version of electronic cash* welche den Grundstein für Blockchain legte. Darin wurde ein System für elektronisches Geld beschrieben, das auf dem Peer-to-Peer-Prinzip beruht. Der Autor war Satoshi Nakamoto, dessen wahre Identität bis heute nicht bekannt ist (Marr 2018).

2009 wurde die Kryptowährung Bitcoin ins Leben gerufen. Ihr Entstehen war nur möglich, dank der Blockchain-Technologie. 2014 wurde Blockchain 2.0 lanciert. Mit dieser Technologie sind *smart contracts* möglich, d. h. die Transaktionen können komplexere Details enthalten.

Heute ist Bitcoin nur eine von hunderten Anwendungen, welche auf der Blockchain-Technologie basieren.

Blockchain zum Schutz unserer Patientendaten? Blockchain ist im Grunde ein dezentraler, digitaler Weg der Buchführung, an dem viele Teilnehmer beteiligt sind. Das Buch mit den Einträgen ist digital, es gehört nicht einem einzelnen Individuum. Die einzelnen Einträge in das Buch können nie mehr verändert werden und existieren, solange das Internet existiert.

Doch wie funktioniert Blockchain im Detail? Wie der Name sagt, ist Blockchain eine Kette (engl. *chain*) von Blöcken (*block*). Miner sind Nutzer, welche die Blöcke aufzeichnen und auf ihre Richtigkeit prüfen. Ihre Computer sind sogenannte Nodes im Netzwerk.

Ein Block enthält in der Regel die folgenden Informationen (Kehrli [2016](#)):

- Hash des vorherigen Blocks: So wird die Kette sequenziell aufgebaut – es kann nur ein Block nach dem anderen beigefügt werden.
- Hash des neuen Blocks basierend auf dem Lösen einer *Proof-of-Work-Aufgabe*.
- Eine oder mehrere Transaktionen.

Am besten können wir Blockchain anhand einer bestehenden Anwendung, z. B. Bitcoin, erklären (Kehrli [2017](#)). Das Prinzip ist Folgendes:

- Nutzer A möchte Bitcoins an Nutzer B schicken – die Transaktion wird an das Netz von beteiligten Nodes gesendet.
- Die Miner prüfen, ob die Transaktion valide ist.

- Der Block wird zur Blockchain beigefügt.
- Nutzer B bekommt die Bitcoins von Nutzer A.

Damit der Block tatsächlich hinzugefügt wird, müssen die Miner eine sogenannte *Proof-of-Work* vollziehen. Dabei handelt es sich um eine schwierige Aufgabe, welche Zeit und Rechenleistung braucht, komplex zu lösen ist, aber einfach von anderen zu verifizieren, sobald sie gelöst ist. Mit der Schwierigkeit der Aufgabe kann die Geschwindigkeit, in welcher die Blöcke hinzugefügt werden, bestimmt werden. Welcher Miner die Aufgabe löst, ist nicht vorhersehbar. Wenn ein Miner die Lösung findet, schickt er diese an die anderen Miner. Diese prüfen die Lösung. Sollten alle die Lösung als valide betrachten, wird der Block in die Blockchain aufgenommen. Dieser Vorgang ist das sogenannte Mining. Die Transaktion ist somit vollzogen, aufgezeichnet, einsehbar und nicht mehr veränderbar. Versucht jemand eine betrügerische Transaktion zu vollziehen, wird diese ebenfalls vom Netz der Miner geprüft und zurückgewiesen, da sie die Voraussetzungen für eine korrekte Lösung nicht erfüllt.

Der Gewinner erhält für das Lösen der Aufgabe selbst Bitcoins. Die anderen Miner erhalten für das „Führen“ des Buches ebenfalls Bitcoins.

Jeder Bitcoin-User hat einen privaten Schlüssel (*private Key*). Das ist seine persönliche Signatur, mit der er seine Bitcoin-Transaktionen beglaubigt. Stiehlt jemand diesen Schlüssel, so kann er dessen Bitcoins stehlen.

Eigenschaften und Anwendungsbereiche

Welche Eigenschaften machen Blockchain so wichtig? Sechs Faktoren spielen dabei eine zentrale Rolle (Mishra 2017):

1. *Dezentralisiert*: Nicht ein Einzeller, sondern mehrere sind beteiligt. Damit wird das System robuster und unabhängiger. Ein Ausfall ist weniger wahrscheinlich. Mittelsmänner werden nicht mehr benötigt.
2. *Unveränderbar*: Wenn eine Transaktion einmal aufgenommen ist, ist es praktisch unmöglich, diese später zu ändern. Es handelt sich damit um eine mit einem Zeitstempel versehene „Wahrheit“. Dies macht Blockchain z. B. sehr geeignet für das Registrieren von Eigentumsrechten.
3. *Transparenz*: Blockchain ist transparent und für alle öffentlich einsehbar. Sie ist damit auch ein Garant für Vertrauen und Sicherheit im Netz.
4. *Datenintegrität*: Blockchain-Daten sind immer komplett, genau, vertrauenswürdig und breit verfügbar. Keine einzelne Partei kann diese Integrität gefährden.
5. *Kosteneinsparungen*: Dadurch, dass nicht mehr einzelne Institutionen eine riesige Infrastruktur aufbauen müssen, wie z. B. Banken, sinken die Kosten dafür. Der Thinktank der Bank Santader schätzt in einer FinTech-Studie, dass damit Infrastrukturkosten in der Höhe von 15–20 Mrd. US\$ bis zum Jahr 2022 im Bankenwesen gespart werden könnten.¹ Ob dies den höheren

¹Süddeutsche Zeitung vom 2. Dezember 2015. „Der größte Reiz für die Banken: Sie könnten massiv Kosten sparen“; <http://www.sueddeutsche.de/digital/banken-das-naechste-grosse-ding-1.2764410-2> Zugegriffen: 1. März 2018.

Energieverbrauch der dezentralen Miner mitberücksichtigt, ist nicht ersichtlich.

6. *Kryptografische Sicherheit*: Verschiedene Konsensus-Mechanismen wie *Proof-of-Work* oder *Proof-of-Stake* garantieren die Sicherheit und Echtheit der Daten.

Diese Eigenschaften machen Blockchain zu einer Technologie, die zahlreiche Bereiche außerhalb des Gesundheitswesens revolutionieren könnte. Beispiele hierfür sind (Garret 2017)²:

- *Banken und Zahlungsverkehr*: Diese Anwendung ist mittlerweile offensichtlich. Manche schätzen, dass Blockchain einen ähnlichen Effekt auf Banken haben wird, wie das Internet auf das Verlagswesen.
- *Versicherungen*: Dieser Geschäftsbereich basiert auf Vertrauen, was die Haupteigenschaft von Blockchain ist. Blockchain wird die Grundlage sein für neue und sichere Versicherungstypen. Beispielsweise wird in Zukunft im Falle eines versicherten Schadens die Auszahlung durch eine Versicherung automatisch erfolgen, und nicht erst nach Überprüfung durch einen Schadensfallsachbearbeiter. Das Netzwerk würde auch sicherstellen, dass der gleiche Schadensfall nicht mehrfach eingereicht wird (Marr 2017). Damit würde auch der Versicherungsbetrug deutlich schwieriger,

²19 Industries The Blockchain Technology Will Disrupt (2017) *Future Thinkers Podcast*. <http://futurethinkers.org/industries-blockchain-disrupt/>. Zugegriffen: 3. März 2018.

wenn nicht sogar unmöglich. Ein Problem, welches alleine in den USA jährlich einen Schaden von über 40 Mrd. US\$ anrichtet.

- *Wahlen:* Hier könnte Blockchain die Grundlage liefern um legitime Wähler zu registrieren und ihre Wahlentscheidung zu dokumentieren. Niemand könnte Stimmen fälschen oder nachträglich ändern. Wahlbetrug wäre damit ein Phänomen der Vergangenheit.
- *Immobilien:* Mit Blockchain könnte das gesamte System in den digitalen Bereich wandern. Mühsamer, kostspieliger und langwieriger Papierkram würde überflüssig, wie auch alle Mittelsmänner, die daran heute verdienen.
- *Musikindustrie:* Mit Blockchain könnten Musikkünstler eine Grundlage bekommen, ihre Royalties zu bekommen. Heute wird geschätzt, dass den Musikern durch die fehlende Transparenz darüber, wer ihre Songs hört, über 80 % der ihnen zustehenden Zahlungen verloren gehen.

Wir werden wahrscheinlich in den meisten Industrien eine Anwendung von Blockchain finden. Die obigen fünf sind nur ein Vorgesmack auf das, was uns erwartet. Das Fantastische an der ganzen Thematik ist, dass wir mehr Transparenz haben werden und weniger kostspielige Systeme. Beides ist letztlich im Interesse von Konsumenten.

Doch nicht alle sehen nur Gutes in den durch Blockchain neu ermöglichten Anwendungen. So hat der Microsoft-Gründer Bill Gates kürzlich bei einer Veranstaltung gesagt, dass Kryptowährungen im wahrsten Sinne des Wortes Menschen umbringen (McKay 2018). Gates kritisiert vor allem, dass die Kryptowährungen Schattenwirtschaft, Finanzkriminalität, Drogenhandel oder Terrorismus revolutionieren.

Die Anonymität hinter den Kryptowährungen ist einer der Hauptgründe hierfür. Ob diese Befürchtungen begründet sind, wird sich in den nächsten Jahren zeigen. Sollte es so sein, werden die Aufsichtsbehörden eingreifen und dem Ganzen ein Ende setzen. Vorher sollten wir wohl eher ein Auge darauf haben, ob sich eine Spekulationsblase rund um die Kryptowährungen aufbaut.

Blockchain wird vielleicht aber eine noch viel fundamentalere Rolle im Wandel unserer Gesellschaft spielen. Die neuen Technologien, und allen voran die auf Blockchain basierten, agieren grenzüberschreitend. Ray Kurzweil, ein berühmter Visionär, sagte kürzlich in einem Interview, dass wir in Richtung einer globalen Kultur, eines globalen Rechtssystems gehen. Nationalstaaten würden zwar weiterhin bestehen und wichtig sein, aber weit weniger einflussreich als heute (Mäki-Teeri 2017).

5.2 Blockchain zum Schutz unserer Patientendaten?

Auch im Gesundheitswesen ist ein wahrer Hype um die mögliche Anwendung von Blockchain entbrannt. Doch ist es ein Hype oder eine Technologie, welche den Umgang z. B. mit Patientendaten grundlegend verändern kann?

Experten gehen davon aus, dass Blockchain zahlreiche Anwendungen im Gesundheitsbereich haben wird (Sharma 2017):

- Interoperabilität und Austausch von Gesundheitsdaten,
- Healthcare IoT und Cybersecurity,

- Echtheit von Medikamenten,
- Forschungsdaten.

Ein grundsätzliches Problem von Patientendaten ist, dass diese verstreut sind über mehrere Systeme. Ein Teil ist in der elektronischen Krankenakte (falls überhaupt elektronisch), ein Teil beim Hausarzt oder Spezialisten, in der Apotheke oder im Labor. Mittels Blockchain könnte ein für das Gesundheitswesen maßgeschneidertes System gebaut werden, welches Gesundheitsdaten sammelt. Anstatt einer Transaktion wäre es dann eine Prozedur oder eine ärztliche Intervention. Somit würden die Patientendaten einheitlich und sicher gesammelt werden. Der Patient könnte jeweils den Zugang verwalten (Orcutt 2017).

Hauptherausforderungen werden sein, die Daten vor Cyberangriffen zu schützen und einer größeren Zahl von unterschiedlichen Nutzern, Zugriff zum Schreiben und falls gewünscht Lesen der Daten zu geben. Das MIT hat einen ersten Prototyp für das Sammeln von Medikamentendaten eines Patienten erstellt (Azaria et al. 2016).

Erste Start-up-Unternehmen haben sich bereits der Aufgabe angenommen, Patientendaten und Blockchain zu verknüpfen. Ein Beispiel hierfür ist das in Tel Aviv angesiedelte Unternehmen Proof Work. Ihre Vision ist es, dem Patienten die Hoheit über die eigenen Patientendaten zu geben (Perez 2017). Heute haben Patienten kaum Kontrolle darüber, wer auf ihre Daten zugreift, geschweige denn, dass Patienten selbst einfachen Zugang zu ihren Daten hätten. In Zukunft sollen alle Daten dezentral gespeichert und vom Patienten „verwaltet“ werden. Geht er zu seinem Arzt, kann er diesem Zugriff auf die Daten gewähren.

Daten sollen sich mit dem Patienten bewegen, umso mehr als der Patient in Zukunft ein viel breiteres System an Teilnehmern haben wird: Telemedizin, KI-basierte Chatbots, Apple, virtuelle Ärzte. Der Patient soll den Zugang zu seinen Daten, oder nur zu einem Teil davon, für all diese Anwendungen und Teilnehmer selbst steuern. Damit würden wir die Hoheit über die eigenen Daten endlich dem Endverbraucher geben und die Daten aus den bestehenden Silos holen (Perez 2017). Apple selbst hat dies bereits mit der Integration des Apple Health Kits und der elektronischen Krankenakte eingeleitet.

Doc.ai ist ein weiteres spannendes Start-up-Unternehmen, welches die Blockchain-Technologie auf medizinische Daten anwendet³. Ihre Vision ist es ebenfalls, dem Konsumenten die volle Kontrolle über seine Daten zu geben. Ihr Fokus besteht auf der Präzisionsmedizin, d. h. auf klinischen und genetischen Daten. Die Technologie basiert auf Blockchain zum Schutz der Daten und KI. Der Konsument kontrolliert, wer wann Zugang zu welchen Daten bekommt. Im Gegenzug, z. B. für die Verwendung der Daten im Rahmen klinischer Forschung, bekommt der Konsument eine Entschädigung in Form von Kryptowährung. Weitere Anwendungen werden KI-basierte Algorithmen und Chatbots sein, welche dem Nutzer helfen zu verstehen, was die ganzen Daten bedeuten und wie er seine Gesundheit verbessern kann.

Was wir weiter oben bereits aufgezeigt haben, wird auch im Bereich der Gesundheit Realität. Nationale Grenzen

³Doc.ai. <https://doc.ai/about>. Zugegriffen: 4. März 2018.

werden weniger wichtig. Wir werden zwar immer noch zu einem Hausarzt oder in eine Klinik gehen, dessen bzw. deren Kosten von unserer Krankenkasse bezahlt werden. Nur wird das in Zukunft nur ein Teil der ganzen Wertschöpfungskette sein. Ein anderer, wichtiger Teil der gesamten Gesundheitsbetreuung wird in den virtuellen, technologiegetriebenen Bereich wandern.

Der zweite Bereich in dem Blockchain eine kritische Rolle spielen wird, ist Healthcare-IoT und Cybersecurity. Heute ist die Sicherheit von Geräten, die über das IoT miteinander verbunden sind, begrenzt. Wenn wir in Zukunft unsere privaten Gesundheitsdaten ohne Bedenken mit anderen Geräten teilen wollen, brauchen wir einen besseren Sicherheitsstandard. Hier kann Blockchain einen Durchbruch erzielen. Es wird aber höchstwahrscheinlich nicht die heutige Form von Blockchain-Technologie sein, sondern eine speziell für IoT entwickelte. So designt Hyundai bereits ein solches System, genannt HDAC (Hyundai Digital Asset Currency)⁴. Der Aufbau des HDACs soll sicher vor Hackerattacken sein durch den Gebrauch von Smart Contracts und HDAC-Tokens. Smart Contracts sind Verträge, die einer Wenn-dann-Logik folgen. Sobald gewisse Voraussetzungen geschaffen sind, treten bestimmte Klauseln in Kraft. Ursprünglich mussten dritte Instanzen dafür sorgen, dass diese Voraussetzungen eingehalten werden. Bei Smart Contracts kann

⁴Ecurrencyhodler: The Solution to IoT Is Blockchain Security (2017) *Hacker Noon*. <https://hackernoon.com/the-solution-to-iot-is-blockchain-security-3e52a8dd812f>. Zugriffen: 4. März 2018.

dies die Technologie autonom übernehmen. Die Tokens stellen eine Form von Mikro-Bezahlform dar und können nicht von Dritten übergangen werden. So kann das System nur von jenen benutzt werden, die solche HDAC-Tokens haben. Aktuell wurde das System noch nicht im Gesundheitsbereich angewendet, es gibt aber einen guten Eindruck, wie eine blockchainverwandte Technologie die Sicherheit von Gesundheitsdaten aus Sensoren und anderen IoT-fähigen Geräten verbessern wird.

Schätzungen zufolge entsteht durch Medikamentenfälschungen ein Schaden von 200 Mrd. US\$ pro Jahr weltweit (Siwicki 2017). Das Schaffen einer vollständigen Transparenz von den Rohmaterialien über die Herstellung des Medikaments bis zum Erreichen des Patienten, ist eine spannende Anwendung von Blockchain. Mittels Blockchain könnte jederzeit verfolgt werden, welchen Weg Medikamente nehmen. Außerdem entstünde volle Transparenz, woher die Rohstoffe kommen, womit eine Qualitätssicherung möglich wäre. Medikamentenfälschungen sind nicht nur ein Problem für wenig bekannte oder einfach herzustellende Medikamente. So wurde die Pharmafirma Genentech in den USA Opfer von Fälschungen ihres Krebsmedikaments Avastin⁵. Wir können uns vorstellen, wie gefährlich es ist, ein solches biologisches Medikament zu fälschen, wenn das Leben eines Patienten davon abhängt.

⁵ibhullar: The Illegal Drug Trade. Leveraging Digitalization and Blockchain to Prevent Counterfeiting of Pharmaceuticals (2017) *Technology and Operations Management*. <https://rctom.hbs.org/submit/technology-and-operations-management/the-illegal-drug-trade-leveraging-digitalization-and-blockchain-to-prevent-counterfeiting-of-pharmaceuticals/>. Zugegriffen: 4. März 2018.

Auch kann Blockchain für *Track and Trace* benutzt werden. Wenn eine Ladung verloren geht, wäre klar, wer als Letzter dafür verantwortlich war. Das klingt vielleicht banal, doch es gibt viele Staaten, welche absichtlich illegale Parallelimporte fördern, um günstiger an Medikamente zu kommen. Diese stammen meist aus anderen Ländern und werden irgendwie aus den Apotheken abgezweigt. Das heißt aber auch, dass in diesen Staaten ein großer Schaden entsteht, denn die Medikamente wurden bereits bezahlt, häufig von öffentlicher Hand. Zu guter Letzt könnte mittels Blockchain eine bessere Kontrolle über verschreibungspflichtige Medikamente mit großem Suchtpotenzial erreicht werden. Ärzte würden das Risiko kaum mehr eingehen, unvorsichtig solche Medikamente zu verschreiben. Dies ist aktuell in den USA ein Riesenthema vor dem Hintergrund des weit verbreiteten und rasant ansteigenden Opioid-Missbrauchs (Felter 2017). Im Hinblick auf die Gefahren von Medikamentenfälschungen und den enormen Schaden, der daraus entsteht, wird diese Anwendung von Blockchain im Gesundheitsbereich wahrscheinlich am schnellsten Fuß fassen.

Auch in der medizinischen Forschung könnte Blockchain eine wichtige Rolle spielen (Benchoufi und Ravaud 2017). So könnte damit die Grundlage geschaffen werden, Forschungsdaten zwischen verschiedenen Parteien einfacher auszutauschen. Auch die Durchführung und Integrität von klinischen Studien könnte mittels Blockchain vereinfacht werden. Z. B. könnte die Technologie dafür benutzt werden, die Einwilligung von Patienten zu bekommen.

5.3 Die Zukunft

Ich denke, dass die Blockchain-Technologie einen sehr wichtigen Trend im Gesundheitswesen in Gang setzen wird, den wir bereits von anderen Industrien kennen. Der Konsument wird viel stärker Herr über das Geschehen werden. Im konkreten Fall wird der Konsument oder Patient, Herr über seine Daten werden. Heute denken Krankhäuser und Pharmafirmen darüber nach, wie sie den maximalen Profit aus Patientendaten schlagen können. Krankenhäuser verkaufen den Zugang zu ihren Patientendaten und zahlreiche Unternehmen haben sich generell auf den Handel mit diesen Daten spezialisiert. Doch wenn Patienten in Zukunft den Zugang zu ihren Daten selbst steuern können, dann werden sie auch am Profit, den die Unternehmen daraus schlagen, beteiligt sein wollen. Das wird wohl weniger der Fall sein, wenn die Forschung lebensrettende Medikamente hervorbringt. Doch generell wird es nicht mehr möglich sein, ohne das Wissen von Patienten die Daten für andere Zwecke zu benutzen.

Dadurch, dass durch die Blockchain Daten auch aus den Silos geholt und interoperabel sein werden, entsteht eine viel bessere Grundlage, sie zu nutzen. Das kann sein, um doppelte Untersuchungen zu vermeiden, um im Notfall alles über den Patienten zu wissen oder, um die Daten KI-Algorithmen zur Verfügung zu stellen. Im Endeffekt ist alles im Sinne des Patientenwohls. Und hoffentlich ist es auch der Anfang eines vom Patienten bestimmten Gesundheitswesens, in dem er mehr Regisseur als Statist ist.

Quellen und Literatur

19 Industries The Blockchain Technology Will Disrupt (2017) *Future Thinkers Podcast*. <http://futurethinkers.org/industries-blockchain-disrupt/>. Zugegriffen: 3. März 2018

Azaria, Asap et al: A Case Study for Blockchain in Healthcare (2016) *IEEE*. <http://dci.mit.edu/assets/papers/eckblaw.pdf>. Zugegriffen: 3. März 2018

Benchoufi, Mehdi, Ravaud, Philippe: Blockchain Technology for Improving Clinical Research Quality (2017) *Trials*, 18, 335. <https://doi.org/10.1186/s13063-017-2035-z>

Doc.ai. <https://doc.ai/about>. Zugegriffen: 4. März 2018

Ecurrencyhodler: The Solution to IoT Is Blockchain Security (2017) *Hacker Noon*. <https://hackernoon.com/the-solution-to-iot-is-blockchain-security-3e52a8dd812f>. Zugegriffen: 4. März 2018

Felter, Claire: The U.S. Opioid Epidemic (2017) *Council on Foreign Relations*. <https://www.cfr.org/backgrounder/us-opioid-epidemic>. Zugegriffen: 4. März 2018

Garret, Olivier: 5 Industries That Blockchain Will Likely Disrupt by 2020 (2017) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/oliviergarret/2017/03/29/5-industries-that-blockchain-will-likely-disrupt-by-2020/>. Zugegriffen: 3. März 2018

ibhullar: The Illegal Drug Trade. Leveraging Digitalization and Blockchain to Prevent Counterfeiting of Pharmaceuticals (2017) *Technology and Operations Management*. <https://rctom.hbs.org/submission/the-illegal-drug-trade-leveraging-digitalization-and-blockchain-to-prevent-counterfeiting-of-pharmaceuticals/>. Zugegriffen: 4. März 2018

Kehrli, Jérôme: Blockchain Explained – Part 2 (2016) *NetGuardians*. <https://www.netguardians.ch/news/2016/12/22/blockchain-explained-part-2>. Zugegriffen: 3. März 2018

Kehrli, Jérôme: Blockchain Explained – Part 1 (2017) *NetGuardians*. <https://www.netguardians.ch/news/2016/11/17/blockchain-explained-part-1>. Zugegriffen: 3. März 2018

Mäki-Teeri, Marianna: Game Over for Nation States? Technology Is Making Country Borders Less And Less Relevant (2017) *Futures Platform*. <https://www.futuresplatform.com/blog/game-over-nation-states>. Zugegriffen: 3. März 2018

Marr, Bernard: A Very Brief History Of Blockchain Technology Everyone Should Read (2018) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/02/16/a-very-brief-history-of-blockchain-technology-everyone-should-read/>. Zugegriffen: 1. März 2018

Marr, Bernard: Blockchain Implications Every Insurance Company Needs To Consider Now (2017) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/10/31/blockchain-implications-every-insurance-company-needs-to-consider-now/>. Zugegriffen: 3. März 2018

McKay, Tom: Bill Gates Thinks Cryptocurrency Is Killing People ,In a Fairly Direct Way‘ (2018) *Gizmodo*. <https://gizmodo.com/bill-gates-thinks-cryptocurrency-is-killing-people-in-a-1823381081>. Zugegriffen: 3. März 2018

Mishra, Sibasish: 6 features that make blockchain unique (2017) LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/6-features-make-blockchain-unique-sibasish-mishra>. Zugegriffen: 3. März 2018

Orcutt, Mike: Blockchain Technology Will Revolutionize Medical Records – just Not Anytime Soon (2017) *MIT Technology Review*. <https://www.technologyreview.com/s/608821/who-will-build-the-health-care-blockchain/>. Zugegriffen: 3. März 2018

Perez, Sarah: Proof Work Aims to Decentralize Medical Data by Using the Blockchain (2017) *TechCrunch*. <http://social.techcrunch.com/2017/12/04/proof-work-aims-to-decentralize-medical-data-by-using-the-blockchain/>. Zugegriffen: 3. März 2018

Sharma, Toshendra Kumar: Blockchain Use Cases For Healthcare Industry (2017) *Blockchain Council*. <https://www.blockchain-council.org/blockchain/use-cases-for-healthcare-industry/>. Zugegriffen: 3. März 2018

Siwicki, Bill: The next Big Thing in Pharmacy Supply Chain: Blockchain (2017) *Healthcare IT News*. <http://www.healthcareitnews.com/news/next-big-thing-pharmacy-supply-chain-blockchain>. Zugegriffen: 4. März 2018



6

Virtual und Augmented Reality in der Medizin

Als Leonardo da Vinci um 1490 sein berühmtes Gemälde des vitruvianischen Menschen mit Feder und Tinte zu Papier brachte, steckte der medizinische Fortschritt noch in den Kinderschuhen – zumindest in Mittel- und Südeuropa. Da Vinci zeichnete auf der nur $34,4 \times 24,5$ cm großen Leinwand eine idealisierte Form des männlichen Körpers. Doch das Bild wäre kein Da Vinci, wenn nicht dahinter auch der wissenschaftliche Anspruch einer der kreativsten Köpfe seiner Zeit zu entdecken wäre. Da Vincis Intension war es, das Idealbild der menschlichen Schönheit darzustellen, und zwar nicht als Absolutes, sondern durch die Beziehung einzelner Teile zueinander (Zöllner 1989). Leonardo Da Vinci gewann seine Proportionsvorstellungen nicht nur aus Dokumenten, Zeichnungen und Skulpturen der antiken Überlieferung,

sondern insbesondere durch Vermessung der Anatomie junger Männer vor und während der Bildentstehung.

Da Vincis Arbeit gilt als Meilenstein in der Beschäftigung mit dem menschlichen Körper. Während man in Italien primär eine Idealisierung und eine Universalisierung fokussierte, versuchte einige Jahre später eine Gruppe von Künstlern und Gelehrten, die sich um das Universalgenie Albrecht Dürer gruppiert hatte, die Proportionen, die Anatomie und Physiognomie des Menschen zu erforschen und zu verstehen. In Dürers schriftlichem Hauptwerk *Vier Bücher von menschlicher Proportion*, das 1528 in Nürnberg erschienen ist, sind die Ergebnisse zusammengefasst (Dürer und Hinz 2011). Darin sind die verschiedensten Proportionentypen wie *gedrungen, dick, schlank* und *überlang* dokumentiert.

Heute betrachten Wissenschaftler rund um den Globus dieses Werk als Mutter aller virtuellen Darstellungen des menschlichen Körpers. Mehr als 500 Jahre nach Da Vinci und Dürer sind die Wissenschaft und die Medizintechnik bestrebt, mithilfe von virtuellen Darstellungen die medizinische Versorgung voranzubringen. Mit Virtual Reality (VR) und moderner Computertechnik ist die Entwicklung und Erprobung neuer Medikamente und neuer interventioneller Verfahren möglich. Virtuelle Patientenmodelle erlauben die Entwicklung individueller Lösungen und die Prüfung von Medikationen hinsichtlich der Wirksamkeit und Verträglichkeit. Virtual Reality kann Demenzkranken helfen, den Fortschritt der Erkrankung zu verlangsamen und zur Behandlung von Phobien sowie von Schlaganfällen eingesetzt werden.

Was genau verstehen wir unter Virtual Reality und wo liegt der Unterschied zu Augmented Reality?

In Wikipedia wird VR wie folgt definiert¹: „Als virtuelle Realität, kurz VR, wird die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer in Echtzeit computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebung bezeichnet.“

Im Gegensatz dazu die Definition von AR aus Wikipedia²: „Unter erweiterter Realität (auch englisch augmented reality (...), kurz AR (...)) versteht man die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung. Diese Information kann alle menschlichen Sinnesmodalitäten ansprechen. Häufig wird jedoch unter erweiterter Realität nur die visuelle Darstellung von Informationen verstanden, also die Ergänzung von Bildern oder Videos durch computergenerierte Zusatzinformationen oder virtuelle Objekte mittels Einblendung/Überlagerung.“

In der virtuellen Realität taucht der Nutzer in eine künstliche Welt ein, meist sowohl akustisch als auch visuell. In der erweiterten Realität ist es eine computergestützte Erweiterung der Realität, wo virtuell zusätzliche

¹Wikipedia: Virtuelle Realität (2018) https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Virtuelle_Realit%C3%A4t&oldid=172776811. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

²Wikipedia: Erweiterte Realität (2018) https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Erweiterte_Realit%C3%A4t&oldid=172907715. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

Information eingeblendet wird. Wir nennen dies auch gemischte Realität (Mixed Reality)³.

Beide Formen werden in der Medizin eine wichtige Rolle spielen. AR mehr, um Ärzte mit erweiterter Information zu versorgen, VR sowohl für Ärzte als auch für Patienten, um sie in eine virtuelle Realität zu führen.

6.1 VR zur Simulation von Operationen

Virtual Reality dient der Simulation und Darstellung von spezifischen Wirklichkeiten und Abläufen mit Hilfe von computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebungen. Den Begriff hat der Autor Damien Broderick in seinem 1982 erschienenen Science Fiction-Roman *The Judas Mandala* geprägt. Seit 1987 wird VR als theoretisches Konzept im Oxford English-Wörterbuch geführt. Einen anderen Weg geht, wie soeben beschrieben, die Vermengung von virtueller und physischer Realität, die Mixed oder Augmented Reality.

Moderne Computer- und IT-Entwicklungen haben virtuelles Computing auf ein beachtliches Niveau gehoben. Um einen ersten Einblick in die Welt des Visual Computing zu bekommen, lohnt es, sich einen digitalen Flugsimulator (oder vergleichbare Applikationen)

³Bandara: Unterschied Zwischen Augmented Reality Und Virtual Reality (2015) <https://www.bandara.ch/blog/vr-typologie-ii-der-unterschied-zwischen-augmented-reality-und-virtual-reality/>. Zugegriffen: 15. Januar 2018.

anzuschauen. Diese Anwendungen vermitteln eine erstaunliche Detailtreue und können inzwischen über VR-Schnittstellen fast wie reale Flugzeuge geflogen werden. Nicht nur in der Pilotenausbildung kommen solche Lösungen zum Einsatz, sondern auch amerikanische Fallschirmspringer unternehmen vor den ersten realen Sprüngen Tests in virtuellen Umgebungen. Raumfahrer sammeln ebenfalls in VR-Umgebungen erste Erfahrungen, bevor man ihnen millionenschweres Flug- und Forschungsequipment anvertraut. Damit ist einer der wichtigsten Anwendungsbereiche von VR genannt: Die Ausbildung und das Testen von neuen Techniken in einem sicheren Umfeld. Da das Ganze in einer virtuellen Umgebung erfolgt, kann der Proband bzw. Nutzer die erforderlichen Aktionen ausführen, ohne dass mit folgeschweren Fehlern durch unsachgemäßen Einsatz oder mit Anwenderfehlern zu rechnen ist. Die Auswirkungen von Fehlern im medizinischen Bereich können – wie jeder weiß – dramatisch sein.

Fans von Online-Spielen und Flugsimulatoren wissen, wie rasant sich die Qualität von solchen Anwendungen in den letzten Jahren verbessert hat. In Amerika wird der beliebte Flugsimulator X-Plane seit geraumer Zeit intensiv in der Pilotenausbildung eingesetzt. Eine ähnliche Entwicklung vollzieht sich in der Medizinerausbildung. Noch sind es überwiegend Elitehochschulen in den USA, die diesen Weg beschreiten, aber es scheint nur eine Frage der Zeit, bis die Simulation zur Basisausbildung von Ärzten und Chirurgen gehört. Die Wirksamkeit dieser zusätzlichen Ausbildungsform belegen inzwischen auch verschiedene wissenschaftliche Studien (Lipner et al. 2010;

Larsen et al. 2010). Bereits heute kommen VR-basierte Trainingssimulationen verstärkt im Curriculum zum Einsatz. Die verschiedenen medizinischen Ausbildungszentren, wie das Clinical Skill Developement Centre/ Queensland (Australien), das Minimal Invasive Surgery Institute (Singapur) und das Wenckenbach Instituut Groningen⁴ (Niederlande) sind Beispiele für die Integration von VR-basierten Schulungen. Auch am European Surgical Institute⁵ (Norderstedt bei Hamburg) werden VR-basierte Medizinkurse angeboten. Das Institut bietet eine Fle von Kursen an, die auf VR setzen, und hat nach eigenen Angaben über 10.000 Spezialisten in über 600 Kursen ausgebildet. Wer sich im Amercian Board of Surgery zum Mediziner ausbilden lassen möchte, muss die Teilnahme an VR-Kursen nachweisen (Satava 2009).

Ausbildung und Training

Als ein wichtiger Anwendungsbereich von VR-Technologien gilt daher auch die Simulation von komplexen Operationen. Diese können in einer „sicheren“ Umgebung so lange wiederholt werden, bis jeder Handgriff sitzt.

Durch den Übergang von der offenen zur minimal-invasiven Chirurgie (MIC) hat sich die Operationstechnik grundlegend verändert. Mit minimalinvasiver Chirurgie bezeichnen wir die *Schlselloch-Chirurgie*. Die Operation erfolgt mittels kleinsten Einschnitte, wobei eine Kamera

⁴Wenckebach Instituut. https://www.umcg.nl/NL/UMCG/Afdelingen/Wenckebach_Instituut/Paginas/default.aspx. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

⁵Johnson & Johnson. <http://www.esi-online.de/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

das Operationsgebiet filmt und der Operateur mit langen Instrumenten durch die Haut hindurcharbeitet, also nicht direkt in Sichtkontakt mit dem darunterliegenden Gewebe ist. Diesen indirekten Kontakt des Operateurs mit dem eigentlichen Operationsgebiet zu üben, wird in der Ausbildung von Chirurgen immer wichtiger. Laut einer amerikanischen Studie des Institute of Health kommt es Jahr für Jahr zu 100.000 Kunstfehlern mit Todesfolge. Migram und Kishino haben die Anwendungsmöglichkeit von VR im Rahmen der Ausbildung von Medizinern bereits 1994 beschrieben (Milgram et al. 1994): Danach eignet sich VR hervorragend für die chirurgische Ausbildung und zur präoperativen Planung. Die erweiterte Variante kann insbesondere für die intraoperative Unterstützung und anatomische Ausbildung verwendet werden.

Das Virtual Human Project der National Library of Medicine World gilt als Startschuss der bildbasierten Ausbildung. Diese Techniken kommen seit Anfang der 1990er-Jahre bei der Bereitstellung entsprechenden Bildmaterials zur anatomischen Ausbildung zum Einsatz (Spitzer et al. 1996). Aktuell ist man allerdings noch weit entfernt von einem flächendeckenden Einsatz von VR-Techniken in der Ausbildung. Verschiedene Studien sind dabei, die Wirksamkeit als Ergänzung des klassischen Anatomiemodells zum Lernen und Lehren zu ermitteln. Zu meiner Zeit, als ich die minimalinvasive Chirurgie übte, machten wir das an einem simplen Plastikbehälter, verschlossen mit einem Tuch, das als Hautnachbildung diente. Nicht die beste Nachbildung einer Operationsumgebung.

Einen hohen Stellenwert wird in der wissenschaftlichen Diskussion der VR-Technik bei der präoperativen Planung attestiert. Vor dem eigenen Eingriff am Menschen können der Operationsverlauf und hier insbesondere die kritische Stelle am virtuellen Patienten durchgespielt werden. Der Operateur kann auf diese Art den sichersten und effektivsten operativen Weg ermitteln. Auch das Durchspielen verschiedener Operationsmethoden ist mithilfe von VR möglich. Dem Patienten kommt dabei zugute, dass sich durch die vorherige Simulation weniger Komplikationen ergeben und ein signifikant besseres Operationsergebnis erzielt wird. Auch Nachfolgebehandlungen und damit Kosten für die gesamte Behandlung können so reduziert werden. Wissenschaftlich belegt ist, dass sich bei verschiedenen Operationsverfahren spürbare Kosten senkungen erzielen lassen (Novak et al. 2007).

VR-basiertes Training hat seinen Ursprung in der Laparoskopie und ist heute in nahezu allen medizinischen Bereichen möglich. Die Qualität der Simulation hängt entscheidend von der Qualität der zugrunde liegenden Bilder und der verwendeten Software ab. Bildmaterial und Software sind heute sehr weit ausgereift. Einzig die Haptik stellt noch eine erhebliche Herausforderung dar.

Weiterentwicklung der VR-Technik

Wesentliche Fortschritte sind bei der Modellierung auch durch die Simulation der Elastodynamik von organischen Strukturen zu erwarten. Mittels In-vivo-Untersuchungen werden gewebespezifische Messwerte gewonnen, die im nächsten Schritt in die Simulationen einfließen. Aktuell ist eine Fülle von wissenschaftlichen Arbeiten in diesem

Bereich tätig. Dazu werden insbesondere empirische Daten der Elastodynamik von Weichteilgewebe und Organen ermittelt⁶ (Ahn und Kim 2010). Die Forschungsbemühungen konzentrierten sich weltweit auf die verbesserte Simulation von minimalinvasiven Eingriffen. Dabei steht die Integration von komplexen Prozessen wie Blutfluss, Atmung und Herzschlag im Mittelpunkt.

Forscher an der Universität Basel haben ein Verfahren entwickelt, das in Echtzeit Computertomografie-Daten in eine dreidimensionale virtuelle Umgebung verwandelt. Die VR-Umgebung der Schweizer mit der Bezeichnung SpectoVive ermöglicht es dem Operateur, sich ein realistisches Bild der anatomischen Strukturen wie Knochen, Gefäße und Gewebe zu machen. Entwickelt wurde SpectoVive von dem Team um Prof. Philippe C. Cattin am Department of Biomedical Engineering der Universität und des Universitätsklinikums Basel (Cattin 2016).

Der Clou des Systems: Es rechnet die zweidimensionalen CT-Schnittbilder ohne Verzögerung in eine dreidimensionale Umgebung hoch. Die Schweizer haben ein weiteres Problem gelöst, an dem vergleichbare Projekte bislang gescheitert sind: Vielen 3D-Simulationen mangelt es an Realitätsnähe. Der Grund ist das Fehlen bzw. die unzureichende Simulation des Schattenwurfs. Dabei ist gerade dieser so wichtig für einen realistischen Tiefeneindruck.

⁶Peterlik, Igor: Real-Time Physically-Based Deformation Modeling – Igor Peterlik. <http://www.peterlik.cz/research/real-time-deformations>. Zugegriffen: 10. Januar 2018.

Konkret können Ärzte sich mit SpectoVive in einem dreidimensionalen Raum bewegen und dabei beispielsweise mit dem Hüftgelenk interagieren. Sie können die Darstellung vergrößern, verkleinern, die Perspektive ändern und die Beleuchtungsrichtung modifizieren. Cattin, der seit Anfang der 1990er-Jahre im Bereich der biometrischen Systeme forscht, gilt als einer der führenden Köpfe in der VR-basierten Medizintechnik. Für ihn liegt der größte Vorteil in der VR-Technologie darin, dass der Arzt sich auf intuitive Weise ein Bild der Gegebenheiten verschaffen kann. Cattin zufolge erlaubt VR in der Medizin zu verstehen, was möglich ist.

Auch erfahrene Mediziner, wie der Augenarzt Dr. Peter Maloca, der am Universitätsklinikum Basel und am Moorfields Eye Hospital London tätig ist, sind von der Technik begeistert. Maloca empfindet die Neuverschaltung der eigenen Sensorik und die Neujustierung der eigenen Wahrnehmung als größten Gewinn. Maloca schwärmt: „Die neue Technologie hat mich zu einem besseren Arzt gemacht.“ (Cattin 2016).

Ganz nebenbei eröffnet das SpectoVive neue Anwendungsmöglichkeiten, an die zunächst niemand gedacht hat: Inzwischen haben verschiedene Museen bei den Schweizern angeklopft und ihr Interesse an der neuen Technik bekundet. Sie erhoffen sich dadurch neue intuitive und zerstörungsfreie Möglichkeiten bei der Erkundung von Exponaten. Als ein interessanter Anwendungsbereich gilt die dreidimensionale Modellierung von Mumien, von denen häufig umfangreiche CT-Untersuchungen vorliegen. Cattin gewährt in einem

YouTube-Video Einblick in die praktische Verwendung des Systems⁷.

Aktuell ist ein Trend erkennbar, wonach die Grenzen zwischen Ausbildung, präoperativer Vorbereitung und realen Operationen zunehmend verschwimmen. Bei der präoperativen Planung wird üblicherweise kurz vor dem realen Eingriff mit patientenspezifischen Daten die Durchführung der Operation geübt. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von *Patient-specific Simulated Rehearsal* (Willaert et al. 2011), kurz PsR. Moderne OP-Simulatoren, wie der NeuroTouch-Simulator⁸ oder Geräte von 3D Systems⁹ oder Surgical Science¹⁰, erlauben inzwischen die Verwendung von Patientendaten. Damit ist die Simulation sehr nah am „Original“ und der Operateur ist bestens vorbereitet. Neben dem Stethoskop wird so das Smartphone mit seinen vielfältigen Möglichkeiten das zweite wichtige Werkzeug der Mediziner.

⁷Virtual Reality in der Medizin: Neue Chancen für Diagnostik und Operationsplanung <<https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Virtual-Reality-in-der-Medizin-Neue-Chancen-fuer-Diagnostik-und-Operationsplanung.html>> [accessed 10 January 2018]. Youtube. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

⁸CAE NeuroVR: The Future of Neurosurgical Training is Here. CAE Healthcare. <https://caehealthcare.com/surgical-simulation/neurovr/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

⁹Simbionix. 3D Systems. <http://simbionix.com/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

¹⁰Surgical Science. Virtual Reality Training Systems for Laparoscopy and Endoscopy. <https://surgicalscience.com/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

6.2 VR in der Schmerzbehandlung, Neurologie und Psychologie

Ein weiterer Aspekt macht VR in vielen Bereichen so interessant: Für die Darstellung werden meist lediglich eine VR-Brille und gegebenenfalls ein oder zwei sogenannte Controller benötigt, mit denen man beispielsweise virtuelle Instrumente führt. Die Darstellungsgeräte haben inzwischen eine hohe Qualität erreicht und werden immer kostengünstiger. High-End-Brillen samt Controller kosten weniger als 1000 EUR. Gute Einsteigergeräte sind bereits ab ca. 120 EUR im Handel erhältlich. Damit ist das Tor zu einem Massenmarkt geöffnet, der nicht mehr an teure High-End-Geräte gebunden ist. In Verbindung mit webbasierten Diensten und Cloud-Services eröffnet sich hier eine Vielzahl neuer Anwendungsbereiche.

Als solche rücken mehr und mehr die Behandlung von psychologischen und neurologischen Erkrankungen in den Mittelpunkt. In der Behandlung von Schlaganfällen und Phantomschmerzen werden ersten Tests zufolge vielversprechende Ergebnisse bescheinigt. Andreas Mühlberger von der Universität Regensburg gilt als einer der Pioniere in der VR-Therapie¹¹. Der Inhaber des Lehrstuhls für Psychologie und Psychotherapie arbeitet seit

¹¹Siehe zu Mühlberger, Andreas: <http://www.uni-Regensburg.de/Psychologie-Paedagogik-Sport/Psychologie-Muehlberger/Team/Muehlberger-Andreas/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018.

mehr als 20 Jahren mithilfe der VR-Technologie an der Behandlung von Angstzuständen. Mühlberger hat bereits Patienten mit Höhenangst erfolgreich behandelt. Dabei macht man sich das Potenzial von VR zunutze, dass Wahrnehmungen sehr schnell emotionale Reaktionen auslösen können. Die von ihm entwickelten VR-Expositionstherapie wirkt bei rund 80 % aller Patienten.

Allerdings sieht der VR-Pionier noch deutliches Entwicklungspotenzial. Das A und O sind laut Mühlberger funktionierende Systeme mit einer hohen Anwendbarkeit. Hierfür muss vor allem die Benutzerfreundlichkeit weiter maximiert werden. VR-basierte Behandlungstechniken würden dabei insbesondere vom technischen Fortschritt profitieren, der massiv von der Gaming-Industrie vorangetrieben wird.

Einem flächendeckenden Einsatz von VR-basierten Therapien steht gemäß Mühlberger nur noch wenig im Wege. Die größte Herausforderung bestehe aktuell neben der Benutzerfreundlichkeit insbesondere darin, die Kosten für Hard- und Software-Pakete weiter zu senken.

Großes Potenzial sehen Mediziner generell in der Behandlung von Schmerzen, z. B. von Phantomschmerzen (Peddie 2017). Mithilfe der VR-Therapie ist eine Reorganisation im Gehirn möglich, mit der die Schmerzen abgemildert oder gar ganz behoben werden könnten.

Schmerzlinderung durch Spiele

Die VR-basierte Schmerzbehandlung erzielt seit Jahren beachtliche Erfolge. Ende der 1990er-Jahre kam Hunter Hoffmann vom Human Interface Lab an der Universität Washington die Idee, Brandopfer mit einer virtuellen kalten Umgebung Linderung zu verschaffen¹². Mit Unterstützung der Paul Allen-Stiftung wurde 2000 die erste Version entwickelt. Das Ergebnis trägt die Bezeichnung SnowWorld. Bislang liegen mehr als 30 Studien vor, die belegen, dass die Schmerzen der Patienten um rund 50 % reduziert werden konnten¹³. Hunter und seine Kollegen zeigen, dass die Teilnahme an dem Spiel den gleichen Effekt wie eine Dosis Morphin erzielt. Ein weiteres wichtiges Ergebnis von Hunters Arbeit: Die Effekte sind umso größer, je realistischer die VR-Darstellungen sind. Die Wirksamkeit lässt sich nochmals mit dem Grad an Interaktionsmöglichkeiten steigern. Für zukünftige Entwicklungen bedeutet das, dass insbesondere an der Realitätstreue und der Interaktivität gefeilt werden muss.

Auch im Bereich VR sind verschiedene Start-up-Unternehmen mit interessanten Entwicklungen am Start. Ein Beispiel ist das amerikanische Unternehmen AppliedVR aus Los Angeles¹⁴. Das Unternehmen bietet verschiedene Lösungen für Patienten und Krankenhäuser. Eine Lösung ist das 3D-Spiel Bear Blast, bei dem

¹²Hunter Hoffman (2006) <https://www.hitl.washington.edu/people/hunter/>. Zugegriffen: 17. Januar 2018.

¹³Human Photonics Laboratory: Virtual Reality Pain Reduction. <http://depts.washington.edu/hplab/research/virtual-reality/>. Zugegriffen: 10. Januar 2018.

¹⁴AppliedVR. <https://appliedvr.io/>. Zugegriffen: 10. Januar 2018.

die Patienten einen sich mit Bären füllenden Raum durch virtuelles Abwerfen der Tiere leeren sollen. Wie eine Studie des Cedars Sinai Krankenhauses zeigt, konnte der auf einer Skala von 1 bis 10 bewertete Schmerz vom Mittelwert 5,5 mithilfe dieses Spiels auf 4,0 gesenkt werden. Laut Brennan Spiegel, der für die Durchführung der Untersuchung zuständig war, ist diese Reduzierung bei akuten Schmerzen eine dramatische Verringerung. Im Rahmen einer umfangreichen Vergleichsstudie sollen diese Ergebnisse nun vertieft werden. Experten sind sich weitgehend einig, dass sich mit zunehmendem Kenntnisstand auch VR-Therapien noch deutlich verbessern lassen.

In eine ähnliche Richtung zielen VR-basierte Behandlungen von Phantomschmerzen. Führend in der Behandlung von Patienten mit Schmerzen, die durch Armamputationen bedingt sind, ist die Technische Hochschule in Göteborg (Catalan 2016). Die Schweden haben ein System entwickelt, bei dem Elektroden am Stumpf angebracht werden und die Muskelaktivitäten aufzeichnen. Mithilfe von VR und einer speziell entwickelten Software werden diese Impulse in einen simulierten Unterarm weitergereicht. Der Patient kann mithilfe des Systems den fehlenden Armteil kontrollieren und Übungen durchführen. Die Ergebnisse dieses Tests sind ebenfalls sehr vielversprechend: Nach nur 12 Behandlungen konnten die Phantomschmerzen um 50 % reduziert werden. Laut Max Ortiz Catalan sind die Resultate besonders bemerkenswert angesichts der Tatsache, dass in der Vergangenheit bei den Patienten drei bis vier verschiedene Behandlungsmethoden nicht angeschlagen hatten. Im nächsten Schritt soll das Verfahren auf Beinamputationen

angewendet werden. Die Forscher hoffen, auch Schlaganfallpatienten und Rückenmarksverletzungen behandeln zu können.

Nicht nur die schwedischen Mediziner von der Technischen Hochschule Chalmers sehen in VR einen Ansatz zur Behandlung neurologischer Schäden, sondern weltweit wird an entsprechenden Lösungen zur neurologischen Rehabilitation geforscht. Global kommt es unterschiedlichen Schätzungen zufolge zu 17 bis 20 Mio. Schlaganfällen jährlich – viele mit Todesfolge. Die Einbußen der motorischen Fähigkeiten nach einem Schlaganfall sind hinlänglich bekannt: Sie haben oftmals erhebliche Beeinträchtigungen der Gleichgewichtsfähigkeit, der Körperhaltung und der Mobilität zufolge. Häufig führen sie zu Einschränkungen der Aktivitäten des täglichen Lebens und der Teilhabe am soziokulturellen Leben (Eng und Tang 2007). Auch bei Schlaganfallpatienten rückt die VR-Therapie immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses. Aus verschiedenen Studien weiß man, dass ergänzendes VR-Training als Zusatz zur Routinephysiotherapie die größten Effekte erzielt (Kim et al. 2009). Bislang ist allerdings unklar, welche Effekte sich mit VR-Trainings mittel- und langfristig erzielen lassen. Auch Fragen der Patientenmotivation scheinen dabei eine wichtige Rolle zu spielen. In der Wissenschaft ist bislang nicht eindeutig ermittelt, welche die optimalen Trainingsintensitäten und -mengen sind. Klar ist nur, dass VR auch diesen Patienten helfen kann.

Trainieren in virtuellen Welten

Unter therapeutischem Gesichtspunkt geht das Schweizer Start-up-Unternehmen MindMaze einen neuen Weg¹⁵. Deren VR-Masken zielen auf die Behandlung von neurologischen Störungen. Dabei macht das System sich den Umstand zunutze, dass typische Bewegungsabläufe bereits im Gehirn hinterlegt sind. Die Maske gaukelt dem Patienten beispielsweise eine Armbewegung vor und versucht so eine Art Neuorganisation und Aktivierung zwischen unterschiedlichen kortikalen Bereichen. Durch Gaming- und Unterhaltungskomponenten sollen die Patienten zusätzlich motiviert werden. MindMaze kooperiert auch mit der Stanford University und der University of California, San Francisco. Dabei steht die Entwicklung von Behandlungs- und Therapiekonzepten von Demenz- und Parkinson-Erkrankungen im Mittelpunkt. Der Wert des Schweizer Unternehmens wird inzwischen auf über eine Milliarde US-Dollar taxiert – eine Summe, die das kommerzielle Potenzial von VR-Lösungen erahnt.

Forscher vom University College London (UCL) haben eine Therapie entwickelt, die Patienten in einem wöchentlichen Intervall wiederholen (Dayantis 2016). Das VR-basierte Szenario ist gerade einmal acht Minuten lang, führte aber bei ersten Tests bei einem Großteil der Probanden zu einer deutlichen Verbesserung der Depressionssymptome. In den virtuellen Szenarien wird versucht, den Patienten mehr Mitgefühl für sich selbst

¹⁵Mindmaze The Neurotechnology Company. *MindMaze*. <https://www.mind-maze.com/>. Zugegriffen: 10. Januar 2018.

beizubringen und weniger selbstkritisch zu sein. Beides hilft, um die Depressionen zu behandeln, so Chris Brewin vom UCL. Brewin zufolge ist es allerdings noch zu früh für eine abschließende Beurteilung der Wirksamkeit von VR-basierten Lernszenarien. Im Rahmen einer umfangreichen Studie sollen die Methoden verfeinert und die Ergebnisse verifiziert werden.

Auch bei der Behandlung Suchtkranker kann VR zielführend eingesetzt werden. Suchtkranke könnten in virtuellen Räumen lernen, einem möglichen Versuch zu widerstehen.

Wie weit die virtuelle Realität gehen wird, ist schwer zu sagen. Sicher ist, dass das Eintauchen in eine virtuelle Welt unzählige Möglichkeiten bietet. Das kann bei simplen Dingen beginnen, wie einen Patienten durch eine Operation oder eine Simulation seines Körpers zu führen. Letzteres könnte helfen, ein besseres Verständnis bei Patienten zu erzeugen. Wenn uns „greifbar“ gezeigt wird, wie z. B. Rauchen zu Krebs und chronischer Lungenerkrankung führt, könnte es leichter sein, Verhaltensänderungen herbeizuführen.

Spannend könnte VR auch für ältere Patienten sein. Einsamkeit ist ein großes Thema. Wie wäre es, wenn die Patienten anstatt alleine Fernzusehen eine virtuelle Reise machen könnten oder virtuelle Freunde treffen könnten? Hier könnte womöglich das größte Potenzial liegen.

6.3 AR und der smartere Arzt

Im Gegensatz zur VR ist der Einsatz von Augmented Reality in vielen Operationssälen bereits heute an der Tagesordnung. So können Operationsmikroskope beispielsweise während einer Operation zusätzliche Informationen in das Sehfeld der Chirurgen einspielen. Damit stehen dem Operateur wichtige Zusatzinformationen zum Navigationspfad oder zu Gewebekonturen zur Verfügung. Gerade bei der Tumorresektion bietet die intraoperative Unterstützung wertvolle Hilfe. Allerdings werden an den Operateur besonders hohe Anforderung gestellt, damit dieser die überlagerten Inhalte fachkundig von den realen Gewebeformen unterscheiden kann.

Die Entwicklung von AR-gestützten Operationsverfahren ist erst am Anfang. Vielmehr steht der nächste Paradigmenwechsel bevor: Der Operateur greift nicht nur auf das Bildmaterial zu, das ihm die Kameras während der Operation liefern, sondern vielmehr liefert ein smartes Instrumentarium, das mit intelligenten Sensoren ausgestattet ist, während der Operation relevante Zusatzinformationen. Ein Operationsroboter sucht sich beispielsweise während der Operation den optimalen Fräskanal. Dabei wird insbesondere das sensorische Feedback für die Bestimmung der optimalen Operationsvariante genutzt. Das Harvard Biorobotics Laboratory hat einen solchen Operationsroboter entwickelt, der beispielsweise bei Bohrvorgängen am Schädel nach dem Durchdringen der Schädeldecke den Vorgang unterbricht, damit nicht darunterliegendes Gewebe beschädigt wird. Fachkreise

gehen inzwischen davon aus, dass mit derlei Werkzeugen in Zukunft sogar Operationen am schlagenden Herzen möglich werden (Kesner and Howe 2011).

Auch AR-gestützten Operationen wird ein beträchtliches kommerzielles Potenzial attestiert. Verschiedene Studien gehen davon aus, dass sich die Investitionen in diese Technik alleine in den USA von 2011 bis 2018 mehr als verdoppeln. Die Verbreitung von VR in der Medizin wird in vielen Bereichen einer besseren Versorgung der Patienten dienen.

Spannend wird es, wenn wir es schaffen, Erfahrungen aus vergangenen Operationen sowie Fakten aus der wissenschaftlichen Literatur in Echtzeit dem Operateur zur Verfügung zu stellen. So könnte er jederzeit wissen, was die Konsequenz einer Handlung sein könnte, z. B. wie ein Einschnitt an einer bestimmten Stelle in der Vergangenheit zu X Prozent zu einer Blutung führte. Das ist vor allem in schwierigen Operationen wichtig, die außerhalb der täglichen Routine liegen.

Wir könnten z. B. auch die Information einzelner Patienten auf unsere Google-Brille projizieren lassen, damit wir ständig darüber informiert sind. Dies könnten z. B. die Vitalfunktionen sein, damit wir schon vor einem Alarm sehen, ob sich der Zustand des Patienten verschlechtert. Dafür werden wir über die Zeit einen Weg finden müssen, eine AR-Brille oder -Linse alltagstauglich zu machen. Sonst können wir wie bisher einen Pager oder das Smartphone benutzen.

Im Endeffekt kann AR dazu führen, dass wir mit freien Händen, was im Klinikalltag häufig hilfreich ist, mehr Informationen zur Verfügung haben, und damit smarter sind als heute.

6.4 Der virtuelle Mensch

In der Fachwelt ist man sich einig, dass die Fortschritte in der medizinischen Simulation insbesondere von den Vorteilen der Weiterentwicklung des Visual Computing profitieren. Immer leistungsfähigere Rechnerarchitekturen werden in der virtuellen und der erweiterten Realität neue Möglichkeiten in der Echtzeitsimulation eröffnen. Bzgl. der Rechenkapazitäten verspricht man sich von der Entwicklung von Quantencomputern die viel zitierten Quantensprünge.

Aktuell stellt die Entwicklung und Simulation des haptischen Feedbacks die größte Herausforderung für die Forschung und Entwicklung von Simulationssystemen dar. Gerade in diesem Bereich ist noch Grundlagenforschung zu leisten, denn die komplexen Abläufe des haptischen Sinnes sind bislang unzureichend erforscht und in Teilen noch nicht bekannt. Die größte Herausforderung für die Medizintechnik der Zukunft wird darin liegen, die Prozesse zu verstehen und im nächsten Schritt in Simulationssoftware zu integrieren.

Die Medizin als Ganzes wird von der Erweiterung und Verfeinerung des anatomischen Modells des Menschen profitieren. Rund um den Globus sind die verschiedensten Projekte entstanden, die sich in den Dienst der virtuellen Darstellung des Menschen oder spezifischer Organe stellen. Ein gelungenes Beispiel ist auf europäischer Ebene das Projekt Virtual Physiological Human (VPH)¹⁶. Dieses Projekt

¹⁶VPH Institute. <http://www.vph-institute.org/>. Zugegriffen: 10. Januar 2018.

basiert auf Konzepten des IUPS Physiome Project, das 1997 ins Leben gerufen wurde. Als erstes Projekt weltweit diente es dazu, die Physiome durch die Entwicklung von Datenbanken und Modellen zu definieren, die das Verständnis der integrativen Funktion von Zellen, Organen und Organismen erleichtern (Hunter und Borg 2003). Das Projekt konzentriert sich auf die Erstellung und Bereitstellung einer zentralen Datenbank, die die unterschiedlichen Informationen aus verschiedenen Quellen bündelt.

Mit dem VPH-Projekt wird nun auf internationaler Ebene versucht, ein Framework zu erzeugen, das die unterschiedlichen Quellen über ein integratives Computermodell zusammenfasst. Das Ziel ist die vollständige computerbasierte Modellierung der mechanischen, physikalischen und biochemischen Funktionen eines Menschen. Unterstützt werden solche Bestrebungen durch verschiedene Spezialprojekte, wie beispielsweise das *Netzwerk Virtuelle Leber*, das sich ganz der Leber verschrieben hat (Holzhütter et al. 2013). Es existieren eine Vielzahl solcher Projekte, die auf Grundlage von bestehendem Bildmaterial an der Modellierung und Simulation von Körperteilen und ihren Funktionen arbeiten¹⁷. Das wichtigste Ziel der verschiedenen Forschungsprojekte ist es, die menschliche Physiologie und Pathologie besser zu verstehen. Dieses Verständnis wird letztlich der

¹⁷Steger, Sebastian, Kirschner, Matthias, Wesarg, Stefan: Articulated Atlas for Segmentation of the Skeleton from Head Amp; Neck CT Datasets (2012) 9th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), pp. 1256–59. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2012.6235790>.

Entwicklung von besseren Diagnosen, Therapien und Präventionsmaßnahmen im Gesundheitswesen dienen.

Parallel muss eine weitere Herausforderung gemeistert werden: Die Verarbeitung der gigantischen Datenmengen. Im medizinischen Bereich spricht man daher auch von der Big Data Challenge. Wie dramatisch sich die Datenmengen verändert haben, zeigt ein Vergleich: Ein CT-Scan mit 100 Schichten beanspruchte vor Jahren lediglich 50 MB Speicherkapazität. Heute nehmen CT-Scanner junger Generation in wenigen Sekunden Datensätze im Terabyte-Bereich auf. Ein Terabyte entspricht 1.048.576 MB. Wir sprechen also von einem Faktor 20.000 (und mehr). Doch die Datenmengen alleine wären nicht das Problem. Vielmehr werden diese gigantischen Datensätze auch noch mit verschiedenen Drittdaten verknüpft. Die Fusionierung der verschiedenen Quelldaten und Modelle stellt höchste Anforderungen an die verarbeitenden Instrumente.

Quellen und Literatur

Ahn, Bummo, Kim, Jung: Measurement and Characterization of Soft Tissue Behavior with Surface Deformation and Force Response under Large Deformations (2010) *Medical Image Analysis*, 14.2, 138–48. <https://doi.org/10.1016/j.media.2009.10.006>

AppliedVR. <https://appliedvr.io/>. Zugegriffen: 10. Januar 2018
Bandara: Unterschied Zwischen Augmented Reality Und Virtual Reality (2015) <https://www.bandara.ch/blog/vr-typologie-ii-der-unterschied-zwischen-augmented-reality-und-virtual-reality/>. Zugegriffen: 15. Januar 2018

CAE NeuroVR: The Future of Neurosurgical Training is Here. CAE Healthcare. <https://caehealthcare.com/surgical-simulation/neurovr/>. Zugriffen: 11. Januar 2018

Catalan, Max Ortiz: Phantom Movements in Augmented Reality Helps Patients with Chronic Intractable Phantom Limb Pain (2016) *Chalmers*. <https://www.chalmers.se/en/departments/e2/news/Pages/Phantom-movements-in-augmented-reality-helps-patients-with-chronic-intractable-phantom-limb-pain.aspx>. Zugriffen: 17. Januar 2018

Cattin, Philippe C. (2016) Virtual Reality in der Medizin: Neue Chancen für Diagnostik und Operationsplanung. <https://www.unibas.ch/de/Aktuell/News/Uni-Research/Virtual-Realitiy-in-der-Medizin-Neue-Chancen-fuer-Diagnostik-und-Operationsplanung.html>. Zugriffen: 10. Januar 2018

Dayantis, Harry: Virtual Reality Therapy Could Help People with Depression (2016) *UCL. University College London*. <http://www.ucl.ac.uk/news/news-articles/0216/150216-virtual-reality-treat-depression>. Zugriffen: 17. Januar 2018

Dürer, Albrecht, Hinz, Berthold: Albrecht Dürer. Vier Bücher von Menschlicher Proportion (1528). (2011) Akademie Verlag, Berlin

Eng, Janice, Tang, Pei Fang: Gait Training Strategies to Optimize Walking Ability in People with Stroke. A Synthesis of the Evidence (2007) *Expert Review of Neurotherapeutics*, 7.10, 1417–36. <https://doi.org/10.1586/14737175.7.10.1417>

Holzhütter, Hermann-Georg, Drasdo, Dirk, Preusser, Tobias, Lippert, Jörg, Henney, Adriano M.: The Virtual Liver: A Multidisciplinary, Multilevel Challenge for Systems Biology (2013) *Wiley Interdisciplinary Reviews. Systems Biology and Medicine*, 4.3, 221–35. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1158>

Human Photonics Laboratory: Virtual Reality Pain Reduction. <http://depts.washington.edu/hplab/research/virtual-reality/>. Zugriffen: 10. Januar 2018

Hunter Hoffman (2006). <https://www.hitl.washington.edu/people/hunter/>. Zugegriffen: 17. Januar 2018

Hunter, Peter J., Borg, Thomas K.: Integration from Proteins to Organs: The Physiome Project (2003) *Nature Reviews. Molecular Cell Biology*, 4.3, 237–43. <https://doi.org/10.1038/nrm1054>

Johnson & Johnson. <http://www.esi-online.de/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018

Kesner, Samuel B., Howe, Robert D.: Position Control of Motion Compensation Cardiac Catheters (2011) *IEEE Transactions on Robotics. A Publication of the IEEE Robotics and Automation Society*, PP. 99, 1–11. <https://doi.org/10.1109/TRO.2011.2160467>

Kim, Joong Hwi, Jang, Sung Ho, Kim, Chung Sun, Jung, Ji Hee, You, Joshua H. et al: Use of Virtual Reality to Enhance Balance and Ambulation in Chronic Stroke. A Double-Blind, Randomized Controlled Study (2009) *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 88.9, 693–701. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e3181b33350>

Larsen, Christian Rifbjerg, Oestergaard, Jeanett, Ottesen, Bent S., Soerensen, Jette Led et al: The Efficacy of Virtual Reality Simulation Training in Laparoscopy. A Systematic Review of Randomized Trials (2010) *Acta Obstetricia Et Gynecologica Scandinavica*, 91.9, 1015–28. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0412.2012.01482.x>

Lipner, Rebecca S. et al: A Technical and Cognitive Skills Evaluation of Performance in Interventional Cardiology Procedures Using Medical Simulation (2010) *Simulation in Healthcare. Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 5.2, 65–74 <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3181c75f8e>

Milgram, Paul, Takemura, Haruo, Utsumi, Akira, Kishino, Fumio: Augmented Reality – A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum (1994) *Spie Vol. 2351*,

Telemanipulator and Telepresence Technologies. http://etclab.mie.utoronto.ca/people/paul_dir/SPIE94/SPIE94.full.html. Zugegriffen: 10. Januar 2018

Mindmaze The Neurotechnology Company. *MindMaze*. <https://www.mindmaze.com/>. Zugegriffen: 10. Januar 2018

Mühlberger, Andreas; <http://www.uni-Regensburg.de/Psychologie-Paedagogik-Sport/Psychologie-Muehlberger/Team-Muehlberger-Andreas/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018

Novak, Erik J., Silverstein, Marc D., Bozic, Kevin J.: The Cost-Effectiveness of Computer-Assisted Navigation in Total Knee Arthroplasty (2007) *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 89.11, 2389–97. <https://doi.org/10.2106/JBJS.F.01109>

Peddie, Jon: Augmented Reality: Where We Will All Live (2017) Springer International Publishing, Heidelberg

Peterlik, Igor: Real-Time Physically-Based Deformation Modeling – Igor Peterlik. <http://www.peterlik.cz/research/real-time-deformations>. Zugegriffen: 10. Januar 2018

Satava, Richard M.: The Revolution in Medical Education – The Role of Simulation (2009) *Journal of Graduate Medical Education*, 1.2, 172–75. <https://doi.org/10.4300/JGME-D-09-00075.1>

Simbionix. 3D Systems. <http://simbionix.com/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018

Spitzer, Victor M., Ackerman, Michael, Scherzinger, A. L., Whitlock, David G. et al: The Visible Human Male. A Technical Report (1996) *Journal of the American Medical Informatics Association*, 3.2, 118–30

Steger, Sebastian, Kirschner, Matthias, Wesarg, Stefan: Articulated Atlas for Segmentation of the Skeleton from Head Amp; Neck CT Datasets (2012) *9th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, pp. 1256–59. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2012.6235790>

Surgical Science. Virtual Reality Training Systems for Laparoscopy and Endoscopy. <https://surgicalscience.com/>. Zugegriffen: 11. Januar 2018

VPH Institute. <http://www.vph-institute.org/>. Zugegriffen: 10. Januar 2018

Wenckebach Instituut. https://www.umcg.nl/NL/UMCG/Afdelingen/Wenckebach_Instituut/Paginas/default.aspx. Zugegriffen: 11. Januar 2018

Wikipedia: Erweiterte Realität (2018) https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Erweiterte_Realit%C3%A4t&oldid=172907715. Zugegriffen: 11. Januar 2018

Wikipedia: Virtuelle Realität (2018) https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Virtuelle_Realit%C3%A4t&oldid=172776811. Zugegriffen: 11. Januar 2018

Willaert, Willem et al: Efficient Implementation of Patient-Specific Simulated Rehearsal for the Carotid Artery Stenting Procedure: Part-Task Rehearsal (2011) *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery: The Official Journal of the European Society for Vascular Surgery*, 42.2, 158–66. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2011.03.032>

Zöllner, Frank: Die Bedeutung von Codex Huygens und Codex Urbinas für die Proportions- und Bewegungsstudien Leonards da Vinci (1989) *Zeitschrift für Kunstgeschichte*, 52. <https://doi.org/10.11588/artdok.00004145>, 334–52



7

Die Roboter kommen

7.1 Roboter operieren

Wenn Peter Kim und sein Kollege Axel Krieger den Operationsaal am renommierten Sheikh Zayed Institute in Washington betreten, ist auf den ersten Blick nicht zu erkennen, dass es sich um einen traditionellen OP-Saal handelt¹. Eine Unmenge an High-Tech-Equipment weckt eher Assoziationen mit einem Forschungslabor. Selbst der Operationstisch zwischen Monitoren, verschiedensten Geräten und Roboterarmen ist kaum auszumachen – ganz

¹Operationsroboter Star – Sheikh Zayed Institute. *Golem.de*. <https://video.golem.de/wissenschaft/17044/operationsroboter-star-sheikh-zayed-institute.html>. Zugriffen: 2. Januar 2018.

zu schweigen von dem Menschen, der auf dem Tisch liegt. Der Star im Operationssaal – im wahrsten Sinne des Wortes – ist ein Operationsroboter mit der Bezeichnung Smart Tissue Autonomous Robot (STAR). Er ist ein Roboter, der autonom Gewebe nähen kann. Eigentlich ist das Institut Teil des Zentrums für Kinderchirurgie, doch auch Forschung und Entwicklung ist ein wichtiger Bereich des Washingtoner Klinikums. STAR befindet sich noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase. Auch wenn der Operationsroboter an einer Kinderklinik entwickelt wird, werden bislang noch keine Operationen am menschlichen Körper durchgeführt, vielmehr dienen Schweine der Erprobung der Technik. Im Operationssaal öffnet Krieger deren Bauchraum und entfernt ein Stück Darm. Das tierische Gewebe ist dem menschlichen sehr ähnlich und eignet sich daher hervorragend zu Testzwecken. Das Entfernen eines Darmstücks gehört in vielen Operationssälen zum Standardrepertoire.

Nach dem Eingriff müssen die beiden Darmenden wieder miteinander verbunden werden. Dazu befestigt der Operateur die beiden Enden auf einem Rahmen samt Fäden. Über die Robotersteuerung gibt der Chirurg die optimale Fadenspannung, den Stichabstand und die ideale Anordnung an. Dann überlassen Kim und seine Kollegen dem Roboter das Operationsfeld. Wie kann man sich das nun in der Realität bildlich vorstellen? Ein Roboterarm, der in seiner Spitze mit einer Art Gewebenähmaschine ausgestattet ist, nähert sich behäbig dem eingespannten Gewebe. Ist die korrekte Position angefahren, beginnt der Roboter mit den Näharbeiten. Dann fährt der Arm behutsam zurück, strafft unter erheblichem Zug das Gewebe

und führt den nächsten Stich aus. Genau an diesem Punkt wird die Innovation von STAR deutlich: Der Operationsroboter näht vollkommen autonom. Der menschliche Chirurg ist bestenfalls ein wachsamer Zuschauer.

STAR ist in verschiedener Hinsicht eine Innovation: Während die meisten Roboter an starren Gebilden wie Knochen etc. arbeiten, kommt die Entwicklung der Washingtoner Ärzte auch mit weichem, sich verändernden Gewebe zurecht. Dabei kommen zwei Kameras zum Einsatz. Eine sogenannte plenoptische Kamera erzeugt mit mehreren Linsen ein dreidimensionales Bild. Der Operateur versieht das Gewebe zusätzlich mit Leuchtpunkten, die von einer Infrarotkamera erfasst werden. Durch den Abgleich der verschiedenen Bildinformationen gelingt das, was lange Zeit als unmöglich erschien: Der Roboter kann das weiche Gewebe operieren.

Kim kann seiner Begeisterung für diesen kleinen, aber wichtigen Entwicklungsschritt in der Roboterchirurgie kaum verbergen: „Dank der Bildkombination weiß der Roboter immer, wo sich das Darmende befindet und passt seinen Nähplan in Echtzeit an.“ (Keutel 2016). Stich um Stich verschließt der Roboter den Schnitt und verknotet die Enden. Der Chirurg verfolgt derweil die Arbeit des Roboters voller Bewunderung angesichts einer Präzision, die kein menschlicher Chirurg hinbekäme. Nur selten muss der menschliche Chirurg in den Vorgang eingreifen und hier und da nachjustieren. Die robotergeführte Rundnadel sorgt für exakte Stiche und ein erstklassiges „Nähergebnis“ (Shademan et al. 2016).

Kim zufolge ist STAR im Bereich der autonomen Roboterchirurgie erst der Anfang. Er vergleicht sein

System gerne mit einem Kind, das gerade die ersten Gehversuche unternimmt, aber vermutlich schon bald sicher und schnell laufen kann. Kim ist zuversichtlich, dass die autonome Roboterchirurgie große Fortschritte machen wird. Um im Bild zu blieben: Die Technik wird mit Siebenmeilenstiefeln voranschreiten. Die bisher mit STAR durchgeföhrten Operationen an Schweinen lassen Positives erwarten: Bislang seien alle Operationen erfolgreich verlaufen und alle Tiere seien wohllauf. Alle Nähte seien dicht geblieben. Einen interessanten Aspekt haben die Vergleiche der Operationsergebnisse von Mensch und Roboter allerdings hervorgebracht: Der menschliche Operateur war zwar schneller, aber der Roboter exakter. Kim: „Es geht uns nicht darum, den menschlichen Operateur durch einen Roboter zu ersetzen, sondern darum, aus der Zusammenarbeit das bestmögliche Ergebnis zu erzielen.“ (Keutel 2016). Das Besondere an STAR: Er gilt als Wegbereiter für das autonome Operieren. Bislang haben Operationsroboter primär die Aufgabe, den Chirurgen bei seiner Tätigkeit zu unterstützen. Oftmals spart man sich durch ihren Einsatz einen weiteren Operateur, der beispielsweise die Kamera bedient.

Kürzlich hat das Team um Kim Daten publiziert, die zeigen, dass STAR unter Aufsicht tatsächlich exakter operiert als erfahrene Chirurgen, auch jene mit einem DaVinci-Roboter. Der Roboter nähe genauer, konsistenter und mit weniger Fehlern (Keutel 2016).

Roboter als Präzisionsexperten

Ortswechsel. Von Washington überqueren wir den Atlantik und nehmen Ziel auf Oxford. An der altehrwürdigen

Oxford University sorgt ebenfalls ein Roboter für Aufsehen. Im Operationssaal liegt ein Patient, dem durch die Vernarbung der Netzhaut eine Teilerblindung droht. Dem Patienten könnte auch ein menschlicher Chirurg helfen, aber neue Techniken versprechen präzisere Behandlungen. Im konkreten Fall stecken mehrere Nadeln im Augapfel des Patienten. Mit diesen zupft der Operateur so lange herum, bis sich die unerwünschte Schicht von der Netzhaut abziehen lässt. Der Vorteil dieser roboterunterstützten Operationstechnik: Die routinierten Augenärzte könnten diese OP auch ohne Robotik durchführen. Sollte es dennoch Probleme mit der Technik geben, können die Operateure den Eingriff erfolgreich zu Ende bringen.

Die filigrane Augen-OP wird mithilfe von Preceyes durchführt. Wie unschwer der Bezeichnung des chirurgischen Roboters zu entnehmen ist, handelt es sich dabei um ein Wortspiel aus *precision* und *eyes*, also Präzision und Auge. Entwickelt wurde das System in Eindhoven von dem Ingenieur und Medizintechniker Perry von Rijsingen. Preceyes ist ein sogenanntes Master-Slave-System, bei dem der Operateur mit Mikroskop und Joystick arbeitet. Der Roboter übersetzt dabei die Joystick-Bewegungen in winzige Schritte im Augeninneren².

Der Operateur bedient mit der einen Hand den Joystick, mit der anderen einen kleinen Roboterarm, der die feine Nadel im Auge des Patienten führt. Preceyes übernimmt bei Augenoperationen zwei Aufgaben: Zum einen setzt er die Bewegungen des Chirurgen in kleinste Schritte

²Preceyes (2016). <http://www.preceyes.nl/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

um, verwandelt also Zentimeter in Milli- und Mikrometer um, zum anderen gleicht er das Zittern der Hand des Operateurs aus. Der Roboter ist in der Lage, jede noch so kleine Fehlbewegung auszugleichen und führt die Nadel absolut ruhig. Die niederländischen Entwickler sind zuversichtlich, dass sie mit dieser Technik in Zukunft Medikamente oder Nanoteilchen direkt unter der Netzhaut platzieren können, um Augenkrankheiten zu heilen. Die Zukunft sieht man sogar in der Gentherapie. Konkret plant man beispielsweise die Injektion eines Virus unter der Netzhaut, der dort genetische Veränderungen vornimmt. Das Ziel ist ehrgeizig: Blinde sollen wieder sehen können.

In der Regel führen jahrelange Erfahrung und Routine zu immer besser werdenden Operationsergebnissen von Chirurgen. Nur können diese ab dem Alter von rund 50 Jahren die Nadel nicht mehr so exakt führen und beginnen, verstärkt zu zittern. Gerade erfahrene Operateure profitieren von derlei Hilfsmitteln. Preceyes basiert auf dem Konzept der Parallelkinematik: Der Operateur führt eine Bewegung aus und der Roboter setzt diese im Auge des Patienten um, nur eben mit einer deutlich höheren Präzision als es der Mensch könnte.

Der dritte Arm des Chirurgen

Noch ein Ortswechsel: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit dem Hauptsitz in Köln erforscht primär die Erde und das Sonnensystem. Doch die rund 8000 Mitarbeiter an den 20 Standorten beschäftigen sich nicht nur mit der Erforschung von entfernten Galaxien, sondern widmen sich auch

ganz irdischen Problemen. Am Institut für Robotik und Mechatronik des DLR werden verschiedene Rotobertechniken entwickelt, die primär den Menschen bei den verschiedensten Aufgaben unterstützen³.

Minimalinvasive Eingriffe gehören in OP-Sälen längst zum Alltag. Bei konventionellen MIC-Eingriffen führen die Chirurgen über kleine Einschnitte in der Haut des Patienten lange, schlanke Instrumente bis zum eigentlichen Operationsgebiet ein. Doch die verloren gegangene Hand-Auge-Koordination und der fehlende unmittelbare Kontakt stellt für den Operateur eine erhebliche Herausforderung dar. Das ist auch ein Grund, warum bis heute komplexe Eingriffe noch nicht minimalinvasiv durchgeführt werden.

Dieses Problems nimmt man sich am DLR seit über einer Dekade an. Dabei spielen Telepräsenz- und Telemanipulationstechniken eine entscheidende Rolle und können helfen, bisherige Einschränkungen zu lösen: Mit Hilfe der minimalinvasiven robotischen Chirurgie (MIRC) bewegt der Chirurg die Instrumente nicht mehr selbst, sondern vielmehr halten Roboterarme die Instrumente und werden durch den Chirurgen ferngesteuert. Das Telechirurgiesystem namens MiroSurge verfügt über eine Eingabekonsole mit einem 3D-Display und zwei haptischen Eingabegeräten sowie drei MIRO-Roboterarmen. Die Roboterarme halten die laparoskopischen Instrumente, die mittels miniaturisierter Kraft-Momente-Sensoren die

³DLR. Institut für Robotik und Mechatronik. <http://www.dlr.de/rmc/rm/desktopdefault.aspx/tabcid-8017>. Zugegriffen: 2. Januar 2018.

Reaktionskräfte des manipulierten Gewebes messen. Der dritte Arm führt automatisch das Stereovideolaparoskop.

Aus der OP-Konsole werden die Videosignale und die gemessenen Kräfte ausgegeben. Das Besondere an MiroSurge: Der Operateur kann das Geschehen im Operationsfeld nicht nur sehen, sondern aufgrund der Force Feedback-Funktion des Systems auch an den Eingabegeräten spüren. Das haptische Feedback kann laut Informationen der Forscher bereits sehr gut von dem System abgebildet werden. Die Ziele des Projekts sind nicht minder interessant: Das Fernziel ist robotergestützte Chirurgie am schlagenden Herzen. Auf diesem Weg sollen in Zukunft negative Auswirkungen von Herz-Lungen-Maschinen auf den Patienten, beispielsweise Blutkontakt mit künstlichen Oberflächen, Notwendigkeit der Hemmung der Blutgerinnung, Entzündungsreaktionen etc. der Vergangenheit angehören. Am DLR werden weitere Projekte im Bereich der Medizinrobotik verfolgt. Ein Highlight ist sicherlich der Einsatz der Robotik bei der minimalinvasiven Wasserstrahlchirurgie. Gewebestrukturen mit einem größeren mechanischen Widerstand gegenüber dem Wasserstrahl wie Nerven oder Blutgefäße bleiben bei solchen Techniken intakt.

Alin Albu-Schäffer, Direktor des Instituts für Robotik und Mechatronik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, bringt die Entwicklung auf den Punkt: „Das Wenigste im OP wird heute noch per Hand gemacht, Ärzte haben heute für alles Geräte. Warum nicht auch für die Operation selbst?“ (Gruber 2015). Die Visionen der Forscher gehen so weit, dass Operationen am schlagenden Herz möglich werden. Der Clou dabei: Der Roboter wird

so gesteuert, dass seine Bewegungen synchron zu den Herzschlägen erfolgen. Der Operateur an der digitalen Steuerkonsole hat es dann mit einem ruhenden Herzen zu tun.

Es ist jedoch wenig wahrscheinlich, dass Roboter uns in den nächsten Jahren oder sogar Jahrzehnten unbeaufsichtigt operieren werden. Dagegen spricht, dass viele Operationen überraschend verlaufen. Was sich nach dem initialen Operationsschnitt darstellt, ist nicht immer gleich. Insbesondere, wenn Patienten bereits eine Voroperation hatten. Wir können deshalb erwarten, dass auch in Zukunft der Chirurg unerlässlich bleibt. Doch werden robotergestützte Technologien ihnen im Alltag helfen, noch präziser zu operieren.

Da Vinci-Roboter – der Klassiker im OP-Saal

Medizinrobotik ist kein neues Feld, sondern vielmehr kommen komplexe Rotobersysteme bereits seit mehr als 15 Jahren weltweit zum Einsatz. Der Klassiker unter diesen Systemen ist das Da Vinci-Operationssystem der kalifornischen Firma Intuitive Surgical⁴. Es handelt sich dabei um ein roboterassistiertes Chirurgiesystem, mit dem minimalinvasive Operationen im urologischen und gynäkologischen Bereich durchgeführt werden. Besonders häufig wird das System in der radikalen Prostatektomie eingesetzt. In den USA sollten 2008 rund 77 % aller Prostataoperationen mit 600 Da Vinci-Systemen durchgeführt worden sein. Das System hat trotz erheblicher

⁴Da Vinci Surgery. (2018) Intuitive Surgical. <http://www.davincisurgery.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018.

Investitionskosten in US-Kliniken eine hohe Verbreitung. Man geht davon aus, dass in Nordamerika mehr als 2500 solcher Systeme zum Einsatz kommen, in Europa rund 800, davon ca. 80 in Deutschland.

Trotz des langen Praxiseinsatzes sind auch neuere Da Vinci-Systeme nicht günstig. Das OP-System kostet rund 2 Mio. EUR., zuzüglich Wartungs- und Servicekosten, die häufig in die Hunderttausende gehen – jährlich wohlgemerkt. Gerade kleinere Krankenhäuser können sich derartige Investitionen nicht leisten. So wundert es nicht, dass auch immer wieder kritische Stimmen laut werden. In einer im *Journal of the American Medical Association* publizierten Studie der Columbia University/New York wurden mehr als 264.000 Gebärmutterentfernungen an 441 Krankenhäusern zwischen 2007 und 2010 mittels konventioneller und robotergestützter Laparoskopie ausgewertet. Die Studie konnte keine nennenswerten Vorteile des Da Vinci-Roboters nachweisen.

Den signifikanten Unterschied in der Verbreitung von Da Vinci zwischen den USA und Europa führen Experten auf einen kulturellen Unterschied zurück. In amerikanischen Krankenhäusern werden Tumore im Rachen- und Kehlkopfbereich häufig mithilfe teurer Robotiksysteme entfernt, während man beispielsweise in Deutschland in der Hals-, Nasen- und Ohrentochirurgie weitestgehend auf den Einsatz von Robotersystemen verzichtet, weil die zu behandelnden Regionen leicht zugänglich sind. Das Beispiel Da Vinci zeigt, welche chirurgischen Robotersysteme in der Zukunft benötigt werden: Sie müssen klein, benutzerfreundlich sowie kostengünstig in der Anschaffung und in der Unterhaltung sein.

Neue Projekte der medizinischen Robotik

Aktuell wird rund um den Globus an Werkzeugen für die roboterunterstützte Chirurgie geforscht und entwickelt. Anhand zweier weiterer Beispiele möchte ich Ihnen zeigen, in welche Richtung dieser medizintechnische Bereich voranschreitet. Die Firma Mazor Robotics, ein Spin-off der Fakultät für Medizintechnik des Technions (Technische Universität Israel/Haifa), hat mit dem gerade einmal handgroßen Renaissance-System einen Roboterarm inklusive OP-Instrumente entwickelt, das auf Wunsch bis zu einer programmierten Position vorfährt⁵. Das System agiert wie eine dritte Hand des Operateurs, bietet aber eine Präzision, die der Chirurg nicht erzielen kann. Der Einsatzbereich ist daher auch bei solchen Operationen zu sehen, bei denen ein Höchstmaß an Präzision erforderlich ist. Der Hersteller sieht die wichtigsten Anwendungsbereiche bei Wirbelsäulenoperationen, minimalinvasiven und perkutanen degenerativen Reparaturen sowie Pedikelschraubenfixierung bei komplexen Wirbelsäulenverformungen. Der Einsatz des Roboterassistenten erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst wird eine dreidimensionale Nachbildung des OP-Bereichs erzeugt. Im nächsten Schritt wird das Robotersystem am OP-Tisch und Patienten fixiert. Der dritte Schritt erzeugt einen 3D-Abgleich der realen Bedingungen mit den Ausgangsinformationen. Im vierten und letzten Schritt führt der Roboter dann die gewünschte Operation aus.

⁵Mazor Robotics. <https://www.mazorrobotics.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018.

Am Lehrstuhl für Kontinuumsrobotik der Universität Hannover entwickelt man einen sogenannten Kontinuumsroboter, der über winzige, tentakelartige Arme mit mehreren superelastischen Röhrchen ausgestattet ist (Burgner-Kahrs 2017). Dank seiner Flexibilität kann er sich Zugang zu Bereichen verschaffen, die bislang kaum oder nicht minimalinvasiv erschließbar waren. Die winzigen Roboter erinnern mehr an Regenwürmer also an operatives High-Tech-Equipment. Anwendungsmöglichkeiten gibt es indes zuhauf. Der Durchmesser eines solchen Kontinuumsroboters beträgt gerade mal 1 bis 2 mm. Durch das innere Röhrchen können Instrumente, wie beispielsweise Lasersonden, geführt werden. Damit werden auch Gehirntumor-Operationen durch die Nase möglich.

Das Besondere an den Kontinuumsrobotern: Sie besitzen keine Verbindung diskreter Gelenke und starrer Verbindungen, sondern zeichnen sich durch eine flexible Rückgratstruktur aus. Die gerade einmal 36 Jahre junge Burgner-Kahrs, Inhaberin des Lehrstuhls für Mechatronik der Leibniz Universität, klärt auf (Burgner-Kahrs 2017): „Bionisch inspiriert von Elefantenrüsseln, Schlangen oder Tentakeln, zeichnen sich Kontinuumsroboter durch ihre hohe Gewandtheit und Manipulierbarkeit aus.“ Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte arbeitet das junge Team an weiteren Anwendungsbereichen, die über das Medizinische hinausgehen. Kleinere Teilprojekte wie METAbot zeigen, welche vielfältigen Möglichkeiten diese Art der Miniroboter bieten. Hinter METAbot verbirgt sich beispielsweise ein kontinuierlicher Roboter, der ein- und ausfahrbar ist und inhärent entlang nichtlinearer Pfade inseriert werden kann, und dass ohne Pfadabweichungen.

Ein letztes Beispiel ist die Zusammenarbeit der Mayo Klinik und Corindus Vascular Robotics (Muoio 2018). Diese Partnerschaft will testen, ob *Telestenting* sicher und machbar ist. Stenting bezeichnet den Vorgang, einen Stent über einen Gefäßzugang in der Hüfte in Herzkrankgefäß einzuführen. Heute ein Routineeingriff bei Patienten mit koronarer Herzkrankheit. Der Clou ist aber, dies über einen Roboter, der aus der Ferne gesteuert wird, durchzuführen. Deshalb *Tele-stenting*. Damit könnten auch Patienten behandelt werden, die keinen Zugang zu den notwendigen Spezialisten haben.

7.2 Roboter in der Pflege und Altersbetreuung

Viele Leser assoziieren im Zusammenhang von Menschen und Robotern die treuen Gesellen R2D2 und C3PO, die in den verschiedenen Star Wars Verfilmungen ihren Gebietern gute Dienste leisten. Heute ist die Robotik in vielen Bereichen weiter, als es George Lukas & Co für möglich gehalten hätten. Ob in Miniaturformat oder als Kampfmaschine: Roboter werden immer leistungsfähiger, intelligenter und vielfältiger einsetzbar. In der Medizinrobotik bestimmt der OP-Roboter als Assistent des menschlichen Operateurs das Bild. Doch es gibt weitere Anwendungsmöglichkeiten, von denen Menschen profitieren.

Die Japaner gelten als besonders technikbegeisterte Nation. Dort kommen bereits seit Jahren Roboter-systeme zum Einsatz, die ältere Menschen in Alltag

unterstützen – sei es, um Kontakt zur Außenwelt zu halten, zur Überwachung von Vitalfunktionen oder einfach nur als humanoider Begleiter. Justin und Toro sind zwei solcher humanoiden Roboter, die aktuell für den Einsatz im Weltraum und auf dem Mars trainieren. Ihre primäre Aufgabe wird es einmal sein, die Umgebung des Mars für menschliche Astronauten vorzubereiten. Von derlei Entwicklungen profitiert auch das Gesundheitswesen. Der Traum vom menschenähnlichen Helfer ist längst Realität. Bislang mangelt es ihnen allerdings noch an der Lernfähigkeit. Greift der Mensch nach einer Getränkedose, einem Glas oder einer Kanne, weiß er intuitiv, wie er greifen muss. Der Roboter muss das alles lernen. Wissenschaftler sind sich indes einig, dass Service- und Assistenzroboter kommen werden. Die Visionen mancher Forscher gehen sogar so weit, dass Menschen mit Querschnittslähmung mit einer künstlichen taktilen Haut wieder laufen können.

Das Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) hat bereits einen voll funktions tüchtigen Roboter für die Hilfe zu Hause oder in Pflege- und Alterseinrichtungen entwickelt. Den care-o-bot. Er kann z. B. Essen und Getränke servieren, beim Kochen oder Putzen helfen und zahlreiche weitere konfigurierbare Funktionen übernehmen.

Roboter gegen Einsamkeit

Wie schnell wir uns an solchen Hilfen in Europa oder den USA gewöhnen werden, ist schwer zu beantworten. In Japan sieht das anders aus. Bereits heute sind über 20 % der Bevölkerung älter als 65 Jahre. Außerdem scheint die japanische Kultur offener für Roboter zu sein. Wie

Deutschland, ist das Land weit vorne in der Entwicklung von Robotern. Honda hat den humanoiden Roboter ASIMO entwickelt, um die bestehende Pflegelücke zu schließen (Muonio 2015). Andere Hersteller setzen auf kleinere Pflegeroboter, die auf dem Nachttisch Platz nehmen können, wie den Dinsow-Roboter von CT Asia Robotics (Tarantola 2017)⁶. Diese Roboter werden nicht nur Haushaltsaufgaben erfüllen können, sondern – viel wichtiger – eine soziale Rolle übernehmen. Sie werden sprechen, unterhalten, soziale Interaktion fördern und Patienten erinnern, ihre Pillen zu nehmen. Ältere Menschen sollen sich so weniger einsam fühlen. Denn Einsamkeit ist nicht nur ein soziales Problem, sondern auch ein gesundheitspolitisches. Einsamkeit führt zu Erkrankungen. Der US-Roboter ElliQ geht noch weiter. Er vernetzt sich mit dem Wetter und schlägt Aktivitäten im Freien oder drinnen vor, wenn Patienten zu lange ferngesehen haben. Und er macht das immer besser. Mittels Machine Learning lernt er, was sein Benutzer mag und was nicht und passt sich dem immer besser an⁷.

Und zu guter Letzt dürfen wir natürlich Haustiere nicht vergessen. Ein überraschendes Beispiel ist die von AIST entwickelte therapeutische Roboter-Robbe⁸. Sie reagiert

⁶Dinsow Care Roboter (2017) CT Asia Robotics. <http://dinsow.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018.

⁷ELLI.Q. Intuition Robotics. <https://www.intuitionrobotics.com/elliq/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018.

⁸PARO Therapeutic Robot. Paro Robots. <http://www.parorobots.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018.

auf Berührung mit Geräuschen und Bewegung und hilft dadurch zum Beispiel Demenzkranken.

Wir werden wohl in den kommenden Generationen Seite an Seite mit Robotern leben. Diese werden uns (hoffentlich) helfen, mit uns sprechen, uns aufmuntern. Unsere Gesundheit steuern und alles, was uns (oder den Robotern) sonst in den Sinn kommen wird.

7.3 Superhumans und Roboter in der Rehabilitation

Unterstützende Roboter in der Rehabilitation gibt es inzwischen einige. Besonders beeindruckend sind die sogenannten Exoskelette. Bekannt wurden sie durch die Filmserie Iron Man, doch inzwischen existieren verschiedene Anwendungen, die weit über die reine Gangunterstützung hinausgehen. Längst haben Wirtschaft, Industrie und Militär die Möglichkeiten erkannt, die sich durch derlei Unterstützung ergeben.

Der amerikanische Flugzeugbauer Lockheed Martin hat beispielsweise ein Exoskelett für Soldaten entwickelt, das diese körperlich unterstützen soll⁹. Da Soldaten im Einsatz oft schwere Lasten über lange Strecken und unebenes Gelände transportieren oder in urbanen Einsatzszenarien Hindernisse überwinden müssen, sind Erschöpfung und Verletzungen häufig die Folge. Der von Lockheed

⁹Extreme Weapons: Human Universal Load Carrier (HULC) Lockheed Martin (2013). <https://www.youtube.com/watch?v=0wgaLyI3deA>. Zugegriffen: 3. Januar 2018.

Martin entwickelte Gangroboter unterstützt solche Einsatzszenarien in verschiedener Hinsicht. Das Skelett mit Namen Hulc (Human Universal Load Carrier) soll das Transportieren von Lasten bis 100 kg über längere Strecken (bis 20 km) und durch unwegsames Gelände erlauben. Auch in der Industrie und überall dort, wo schwere Lasten von Menschen bewegt werden müssen, kann diese Form der Roboterunterstützung hilfreich sein. Das Grundprinzip dieser Prothesen ist einfach: Sie leiten das Gewicht durch eine intelligente skelettartige Struktur ab.

Für Menschen mit eingeschränkter Lauffähigkeit ist das Exoskelett eine echte Bereicherung, denn es verleiht ihnen die verloren gegangene Mobilität – zumindest teilweise. Wie die amerikanische Fachzeitschrift *Science* berichtet, wird der Energieverbrauch durch ein solches Hilfsmittel um ein Drittel gesenkt. Je nach Modell werden bereits durch einfache Gewichtsverlagerungen Schritte ausgelöst. Dabei profitiert der eingeschränkte Patient in vielerlei Hinsicht: Neben Mobilität wird sein Kreislauf stabilisiert, die Darmtätigkeit verbessert und die Patienten leiden weniger an Schmerzen. Allerdings zeigen erste Studien auch, dass die Patienten Unterstützung beim Gehen benötigten. Als wichtigster Einsatzbereich gilt bis auf Weiteres die Rehabilitation. Das südkoreanische Schiffbauunternehmen Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering testet derlei Werkzeug: In verschiedenen Produktionsbereichen werden Prototypen in der Praxis eingesetzt. Auch Samsung und Hyundai sind an diesen Entwicklungen beteiligt. Inzwischen haben diese Systeme sogar Marktreife erreicht: Als erster deutscher Hersteller bietet der Augsburger Robotikspezialist German Bionic

Systems nach mehrjähriger Entwicklungsarbeit marktreife Exoskelette für den Einsatz in der industriellen Produktion an. Es ist gut denkbar, dass diese Systeme nach initialem Erfolg in der Industrie, wo sie primär eine präventive Aufgabe haben und vor Verletzungen des unteren Rückens schützen, ihren Weg in die Rehabilitation finden.

Kleidungsähnliche Roboterprothesen

Die meisten Exoskelette ähneln roboterartigen Hüllen für Menschen. Sie besitzen ein aus Metall bestehendes Gerippe, das dem Patienten die notwendige Stabilität bietet. Doch das könnte sich in Zukunft grundlegend ändern, denn DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), eine Behörde des US-Verteidigungsministeriums für rüstungsspezifische Forschungsprojekte, hat Forscher der Harvard University damit beauftragt, ein Exoskelett der besonderen Art zu entwickeln: Die neuen Roboteranzüge sollen die Leistungsfähigkeit von US-Soldaten steigern. Dazu verzichtet das Harvard-Exoskelett auf eine starre Metallkonstruktion, das Material besteht vielmehr aus Stoff. Aus diesem Grund haben die Forscher um Projektleiter Conor Walsh ihre Entwicklung auch Soft Exosuit benannt (Asbeck et al. 2014).

Den Soft Exosuit trägt man nicht wie herkömmliche Exoskelette über der Kleidung, sondern vielmehr wie Unterwäsche darunter. Die Gehhilfe imitiert die Muskel- und Bänderbewegungen und unterstützt dadurch die Gelenke. Zwar ist das Konzept eines tragbaren Roboters nicht neu; neu ist allerdings der am Wyss Institute verfolgte Ansatz. Die Forscher der amerikanischen Harvard University haben in ihrem Prototypen Riemen an den

Beinen verwendet, die sich an den darunterliegenden Muskeln und Bändern orientieren und deren Funktionen nachahmen. Am Gürtel sind sogenannte Aktoren – das Gegenstück zu Sensoren – befestigt, die über Seilzüge Kraft auf die Gelenke übertragen. Durch diesen simplen, aber effektiven Ansatz wird der Träger des Anzugs in seinen Bewegungen unterstützt.

Die Riemen übernehmen dabei verschiedene Funktionen. Zunächst einmal sind dort dehnbare Sensoren integriert, die die Bewegung des Trägers erfassen und für die optimale Unterstützung zum richtigen Zeitpunkt sorgen. Ein Minicomputer ist dabei für die Steuerung des gesamten Anzugs verantwortlich. Die Stromversorgung erfolgt über spezielle Akkus. Conor Walsh und sein Team haben sich dabei einmal mehr von der Biomechanik des menschlichen Gangs inspirieren lassen. Dazu sei insbesondere ein sehr genaues Verständnis des Gangs nötig, doch gerade in diesem Bereich gibt es laut Aussage des amerikanischen Wissenschaftlers noch erheblichen Forschungsbedarf (Asbeck et al. 2014). So leisten die Forscher denn auch wichtige Grundlagenforschung. Für den Praxiseinsatz bedarf es außerdem spezieller Gewebe, elastischer Stromversorgungssysteme und weicher Sensoren – auch hier stehen die notwendigen Erkenntnisse noch nicht zur Verfügung.

Die DARPA formuliert das ehrgeizige Ziel des Projekts: Verletzungen des Bewegungsapparates durch dynamische Ereignisse, die typisch für die Lebensumstände eines Soldaten sind, zu verhindern oder zu reduzieren. Die Forscher gehen davon aus, dass sie in naher Zukunft einen leichten Anzug entwickeln können, der nicht nur

für militärische, sondern auch für zivile Anwendungen geeignet ist. Insbesondere die Medizin und hier speziell die Rehabilitation könnten von der Entwicklung profitieren. Bei akuten und chronischen Verletzungen des Bewegungsapparats, bei Muskelschwäche sowie in der Rehabilitation von Schlaganfallpatienten tun sich verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten auf.

Und dann gibt es noch Hal, einen cyborgartigen Roboter, der Intentionen des Patienten in Bewegungen umwandelt. So können Patienten mit Gehbeeinträchtigungen wieder laufen lernen. Spannend dabei ist, dass Hal dazu führt, dass das Nervensystem lernt, auf eine neue Weise Bewegungsanweisungen zu senden, und somit geschädigte Nervenbahnen umgehen kann¹⁰. Die Information wird vom Roboter über Hautimpulse abgelesen. Das japanische Unternehmen Cyberdyne nennt dies die Verschmelzung von Mensch, Maschine und Information.

7.4 Was bringt die Zukunft?

Noch gibt es in der Bevölkerung beträchtliche Vorbehalte hinsichtlich des Einsatzes von Robotik in der Medizin und der Pflege. Wie die Studie *Health Trends* zeigt, ist die Angst überwiegend irrational und stark an humanoide Vorstellungen geknüpft. Das ist angesichts unzähliger vielversprechender und richtungsweisender Entwicklungen nur bedingt nachvollziehbar. Schon heute existieren

¹⁰Cyberdyne. <http://www.cyberdyne.jp/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018.

verschiedene High-Tech-Prothesen, die über Mensch-Maschine-Schnittstellen steuerbar sind. Dazu bedarf es in der Regel vorhandener Nerven- und Muskelimpulse. Allerdings sind sogenannte Brain-Computer-Interfaces, kurz BCI, noch in der Grundlagenforschung.

In verschiedenen Bereichen, wie der Knie- und Hüftgelenks-Operationen, kommen heute Computer-Roboter zum Einsatz. Der Stryker Mako ist beispielsweise ein solches System, das international bei mehr als 50.000 Knieoperationen eingesetzt wurde. Allerdings ist bis heute nicht wissenschaftlich erforscht, ob die Ergebnisse und die hohen Erwartungen für die Zukunft berechtigt sind. Momentan ist kaum abschätzbar, wann Operationsroboter Einzug in den Krankenhausalltag nehmen, denn noch sind die Automatisierungsprozesse nicht ausreichend. Experten sind sich indes einig, dass die Roboterchirurgie in den nächsten Jahren richtig an Fahrt gewinnen wird. In der Praxis ist die Grenze des mechanisch Machbaren durch einen Chirurgen erreicht. Erst mit Unterstützung von intelligenten Robotersystemen wird man den nächsten Entwicklungsschritt nehmen können.

Die Robotik eröffnet den Medizinern bislang unerreichte Möglichkeiten, präzise zu operieren und in bislang nur schwer zugänglichen Bereichen operativ einzugreifen. Vieles von dem, was sich aktuell in der Entwicklung befindet, wird in den kommenden Jahren in den OP-Sälen Einzug halten. Die Medizin ist indes noch lange nicht für autonomes Operieren bereit – die Patienten auch nicht. Hier drängt sich der Vergleich zum autonomen Fahren auf: Diese Art der Technik wird über kurz oder lang kommen. Aber es sind mehr offene Fragen zu beantworten,

als technische Herausforderungen zu bewältigen. Noch befindet sich die Medizinrobotik in der Assistenzphase.

In der Altersversorgung wird der Mangel an Pflegefachkräften dazu führen, dass Roboter dort Einzug halten werden. Kulturelle Unterschiede werden diese entweder beschleunigen (Japan) oder verlangsamen (Europa). Doch je besser die Technik wird, je mehr Nutzen von den Robotern kommt, desto kleiner werden die Vorbehalte sein.

Spannend ist die Zukunft der Exoskelette und der cyborgartigen Roboter.

Kritisch wird sein, zu entscheiden, wo wir die Grenze ziehen: folgen wir einer Idee, bessere Menschen aus uns zu machen, oder dem Ziel, Gesundheit wiederherzustellen. Wie wir am aktuellen Trend des Biohackings sehen, wollen viele Menschen „besser“ und leistungsfähiger werden. Dies wird natürlich dazu führen, dass, zumindest wer es sich leisten kann, diese Technologien dazu nutzen wird, schneller, stärker und ausdauernder zu werden. Das muss an sich nicht negativ sein, wie wir beispielsweise am Boom der Elektrofahrräder sehen. Plötzlich können Altersgruppen überhaupt wieder Radfahren oder sich auf ausgedehnte Radtouren begeben, welche vorher undenkbar waren. Kritisch wird sein, wenn diese Technologien in die falschen Hände geraten, und wir mit *Superhumans* konfrontiert sein werden. Unter Superhumans können wir uns Menschen vorstellen, wie sie uns im Kino begegnen. Als Illustration können wir uns Robert Downey Jr. in dem Film „Ironman“ ansehen. Ein normaler Mensch mit einem Exoskelett, das ihm übermenschliche Kräfte verleiht. Wir müssen es aber nicht ganz so extrem betrachten, um uns vorzustellen, welchen Schaden jemand mit einer vergleichbaren Technologie anrichten könnte.

Quellen und Literatur

Asbeck, Alan, De Rossi, Stefano, Galiana, Ignacio, Ding, Ye, Walsh, Conor: Stronger, Smarter, Softer. Next-Generation Wearable Robots (2014) *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 21.4, 22–33

Burgner-Kahrs, Jessica: LKR. Forschung (2017) Lehrstuhl für Kontinuumsrobotik. <https://www.lkr.uni-hannover.de/research.html>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Cyberdyne. <http://www.cyberdyne.jp/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Da Vinci Surgery. (2018) *Intuitive Surgical*. <http://www.davincisurgery.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Dinsow Care Roboter (2017) CT Asia Robotics. <http://dinsow.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

DLR. Institut für Robotik und Mechatronik. <http://www.dlr.de/rmc/rm/desktopdefault.aspx/tabcid-8017>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

ELLI.Q. *Intuition Robotics*. <https://www.intuitionrobotics.com/elliq/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Extreme Weapons: Human Universal Load Carrier (HULC) Lockheed Martin (2013). <https://www.youtube.com/watch?v=0wgaLyI3deA>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Gruber, Angela: Technik im OP. Wie Roboter die Medizin verändern (2015) *Golem.de*. <https://www.golem.de/news/technik-im-op-wie-roboter-die-medizin-veraendern-1509-116109.html>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Keutel, Sascha: Robot Outperforms Standard Surgery Techniques (2016) Healthcare in Europe. <https://healthcare-in-europe.com/en/story/16773-robot-outperforms-standard-surgery-techniques.html>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Mazor Robotics. <https://www.mazorrobotics.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Muoio, Danielle: Japan Is Running out of People to Take Care of the Elderly, so It's Making Robots Instead (2015) *Business Insider*. <http://www.businessinsider.com/japan-developing-care-robots-for-elderly-care-2015-11>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Muoio, Dave: Preclinical Mayo Clinic Study to Investigate off-Site, Robotic-Assisted Coronary Procedures (2018) Mobi-HealthNews. <http://www.mobihealthnews.com/content/preclinical-mayo-clinic-study-investigate-site-robotic-assisted-coronary-procedures>. Zugegriffen: 6. Januar 2018

Operationsroboter Star – Sheikh Zayed Institute. *Golem.de*. <https://video.golem.de/wissenschaft/17044/operationsroboter-star-sheikh-zayed-institute.html>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

PARO Therapeutic Robot. *Paro Robots*. <http://www.parorobots.com/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018

Preceyes (2016). <http://www.preceyes.nl/>. Zugegriffen: 2. Januar 2018

Shademan, Azad, Decker, Ryan S., Opfermann, Justin D., Leonard, Simon, Krieger, Axel, Kim, Peter C.W.: Supervised Autonomous Robotic Soft Tissue Surgery (20016) *Science Translational Medicine*, 8.337, 337ra64. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aad9398>

Tarantola, Andrew: Robot Caregivers Are Saving the Elderly from Lives of Loneliness (2017) *Engadget*. <https://www.engadget.com/2017/08/29/robot-caregivers-are-saving-the-elderly-from-lives-of-loneliness/>. Zugegriffen: 3. Januar 2018



8

3D-Drucken – wir designen uns selbst

Der New Yorker Stadtteil Brooklyn beherbergt mit dem Unternehmen Health Maker Lab eine dieser kleinen, innovativen Firmen, die das Gesundheitssystem in ihren Grundfesten erschüttern und erneuern könnte. Von Haus aus ist Health Maker Lab auf die Herstellung von kosten-günstigen Prothesen und medizinischen Geräten mit 3D-Druckern spezialisiert¹.

Mit seinen rund 40 Mitarbeitern hat der Mittschziger Land Grant sich auf die Herstellung von günstigen bio-medizinischen Geräten spezialisiert. Grant, der optisch

¹Grant et al. Why These Citizen-Scientists Are Launching a Nonprofit Maker Lab Focused on Health (2016) *Technically Media*. <https://technical.ly/brooklyn/2016/02/16/why-these-citizen-scientists-are-launching-a-nonprofit-maker-lab-focused-on-health/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018.

an den Sean Connery zu seinen Zeiten als *Name der Rose*-Darsteller erinnert, und auf ein bewegtes Leben zwischen Anglistik, Militär und Medizintechnik zurückblicken kann, hat mehr im Sinn, als nur einfache Prothesen als Ersatzteile für den menschlichen Körper herzustellen. Er träumt insbesondere von einem demokratischen Gesundheitswesen.

Sein Interesse für den 3D-Druck wurde eher zufällig durch den Besuch der World Maker Fair, eine der großen Tüftlermessen in New York, geweckt. Grant erkannte schnell das gewaltige Potenzial für den Medizinbereich. Welchen radikalen Wandel der Einsatz der 3D-Technologien in der Medizintechnik in Gang bringen kann, zeigen zwei Zahlen: Eine herkömmliche Prothese kostet Grant zufolge zwischen 24.000 und 25.000 US\$. Die Kosten für das identische Ergebnis aus einem 3D-Drucker liegen um Welten darunter: Eine so angefertigte Prothese dürfte zwischen 150 und 200 US\$ kosten. Man darf davon ausgehen, dass sich die Kosten durch den technologischen Fortschritt in geringem Umfang weiter reduzieren lassen. Die technischen Entwicklungen und die damit verbundenen radikalen Kostensenkungen haben somit auch eine demokratische Komponente, weil die Nutzung für nahezu alle Bevölkerungsgruppen möglich wird.

Schätzungen zufolge stammen rund 40 % aller Unternehmen im biomedizinischen 3D-Druckbereich aus den USA. Bereits 2015 konnte die Branche 380 Mio. US\$ Gewinn einfahren – eine stolze Summe angesichts einer so jungen Technik. Experten prognostizieren im Bereich des medizinischen 3D-Drucks bis 2022 einen Durchbruch der Milliardenmarke. Welche Relevanz dem Bereich 3D-Druck in der Medizintechnik beigemessen wird,

zeigt die Anzahl wissenschaftlicher Publikationen (PubMed). 2012 gab es insgesamt acht Publikationen mit den Begriffen *3D printing medicine*. 2017 waren es bereits 457.

8.1 Technologie

3D-Drucker werden der additiven Herstellungstechnik (additive manufacture, kurz AM) zugerechnet. Im Unterschied zur subtraktiven Herstellung, bei der dreidimensionale Objekte durch Schneiden, Schnitzen und Fräsen erzeugt werden, fügt die AM-Technik Materialien hinzu. Und wie wir uns vorstellen können, passt diese viel besser zur menschlichen Biologie. Wir werden weder gefräst, noch geschnitten, sondern wachsen durch das Zusammenkommen von verschiedenen Zellschichten. Ähnlich dem 3D-Druck.

Dabei gibt es drei grundsätzliche Verfahren des 3D-Drucks (Cui et al. 2012; Hoy 2013):

- Fused deposition modeling (FDM),
- Laser sintering (SLS),
- Thermal inkjet (TIJ) printing.

Fused deposition modeling (FDM)

FDM ist ein Verfahren ähnlich den Tintenstrahldruckern. Es wird jeweils mittels eines Druckkopfes oder mehrerer Druckköpfe Material abgelagert, in der Regel erwärmtes Plastik. Beim Abkühlen festigt sich das Plastik jeweils. Dies geschieht Schicht für Schicht, bis das Objekt fertiggestellt ist.

Laser sintering (SLS)

Im SLS Verfahren wird Pulver als Substrat benutzt. Dabei wird mit einem Laser das Pulver einer Schicht jeweils verschmolzen. Danach die nächste Schicht gelegt und wieder mittels Laser verschmolzen. So entsteht das Objekt Schritt für Schritt. Dieses Verfahren kann bei Metallen, Plastik oder Keramik zum Einsatz kommen.

Thermal inkjet printing

Noch einen Schritt weiter geht das Thermal Inkjet Printing. Hierbei handelt es sich um eine Drucktechnik ohne Kontaktpunkte zwischen Druckerdüse und bedruckbarem Material. Dabei wird mittels elektromagnetischer oder piezoelektrischer Energie Tropfen von Tinte abgelagert gemäß der Vorlage. Diese Tropfen können sehr klein sein und aus zahlreichen Materialien bestehen.

Diese Drucktechnik ist vielseitig einsetzbar. Im medizinischen Bereich wird diese Technik beispielsweise für 2D- und 3D-Gewebeanwendungen sowie avaskuläre und vaskuläre Gewebedrucke verwendet. Zu den vielversprechenden klinischen Anwendungen zählt die Entwicklung eines handlichen Druckers für die direkte Gewebereparatur. Man könnte diese Technik verwenden, um von gescannten Läsionen (Verletzungen) per Bio-printing Zellen, Wachstumsfaktoren und Biomaterialgerüste präzise zu erzeugen und den Schaden zu beheben. Diese Technik wurde bereits erfolgreich zur Mikrovaskulatur-Fertigung eingesetzt. Daher gilt sie derzeit als die ultimative Lösung für die Entwicklung von Geweben mit komplexen Vaskulaturen und Innervationen.

Heute sind 3D-Drucker so günstig, dass man sie in jedem gut sortierten Computershop für wenige hundert Euros erwerben kann. Diese günstigen Geräte sind auf die Verwendung von Kunststoffen wie Acrylnitril-Butadien-Styrol und Polyactid beschränkt. Insbesondere Polyactid ist aufgrund seiner einfachen Verarbeitbarkeit ein beliebtes Rohmaterial. Im (semi-)professionellen Bereich kommen überwiegend 3D-Pulverdruckverfahren und das Lasersintern zum Einsatz. Will man Metalle, hochwertige Kunststoffe oder Keramik für den Druck verwenden, ist das Lasersinternverfahren die bevorzugte Technik.

8.2 Meilensteine

Man mag es kaum glauben, aber der erste 3D-Drucker wurde bereits 1984 von dem US-amerikanischen Ingenieur Chuck W. Hull entwickelt. Zwei Jahre später, am 11. März 1986, meldete er das Patent für seine Apparatur zur Herstellung dreidimensionaler Objekte an. Hull vermarktet seit den 1980er-Jahren seine Erfindung mit dem von ihm gegründeten Unternehmen 3D Systems. Heute beschäftigt das Unternehmen rund 2100 Mitarbeiter und machte 2016 633 Mio. US\$ Umsatz².

In Bezug auf die Medizintechnik wurde der Einsatz der 3D-Technik zum ersten Mal 1999 von einer breiten Öffentlichkeit wahrgenommen. Ende des letzten

²3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services. 3D Systems. <https://www.3dsystems.com/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018.

Jahrtausends wurde einem Patienten eine künstliche Harnblase implantiert. Hierfür wurde ein 3D-Gerüst in der ursprünglichen Form der Harnblase des Patienten nachgebildet, anschließend mit Zellen aus einer Gewebeprobe beschichtet und dem Patienten implantiert (Whitaker 2014).

Als Durchbruch gilt die Entwicklung von Wissenschaftlern am Wake Forest Institute, die 2002 eine funktionierende Niere mit *Bio-Tinte* schufen. Zwar konnte das replizierte Nierengewebe nicht mit menschlichem Gewebe beschichtet werden, aber dennoch gilt dieser Vorgang allgemein als Proof-of-concept – ein Beweis für ein eindrucksvolles Konzept. Für die beiden nächsten Meilensteine ist das britische CARTIS-Team (Centre of Applied Reconstructive Technologies in Surgery) verantwortlich, die 2006 einem verunglückten Motorradfahrer Titan Gesichts-Implantate implantierten. Ein weiterer Meilenstein folgte im April 2013: Das US-Unternehmen Organovo erzeugte das erste zelluläre Lebergewebe mithilfe eines 3D-Druckers.

Unglaublich spannend ist auch die Technologie des in der Schweiz beheimateten Unternehmens Xeltis. Im engeren Sinne handelt es sich hier jedoch nicht um 3D-Druck, sondern *3D-Spinnen*. Das Unternehmen ist ein Pionier auf dem Gebiet, Herzklappen über 3D-Gerüste nachzubilden, welche dann in Laufe der Zeit mit Zellen besiedelt werden und sich in „normales“ Gewebe umwandeln. Der Vorteil ist, dass diese Klappen organisch sind und viel länger halten als z. B. Schweineklappen. Für Kinder macht das mehr als einen kleinen Unterschied. Anstatt eine zweite offene

Herzoperation bereits wieder im Jugendalter zu benötigen, wachsen die Klappen von Xeltis mit dem Kind³.

Doch nicht nur die Patienten in reichen Ländern profitieren von diesem Fortschritt. Fast schon Routine ist heute die Versorgung von beinamputierten Menschen aus Uganda, die an der Universität Toronto durch die Unterstützung der Wohltätigkeitsorganisation Christian Blind Mission Canada mit Prothesen aus dem 3D-Drucker versorgt werden (Patchen 2014).

In der Anfangszeit der 3D-Technik begrenzten Lasersintering- und 3D-Druck-Pulver den Einsatzbereich der Druckergebnisse. Anfangs war man überwiegend auf die Verwendung von Metall- und Keramikmaterialien beschränkt. Einen deutlichen Schritt nach vorne brachte die Entwicklung von Fused Deposition Modeling. Aus biomedizinischer Sicht stellen die Entwicklungen des Tissue Engineering einen Durchbruch dar. Damit werden Polymere entwickelt, die zu den ersten biologisch abbaubaren Materialien zählen, die in der additiven Fertigung sinnvoll eingesetzt werden können. Das Bioprinting mit der Integration von lebenden Zellen stellt einen weiteren Meilenstein dar.

Die Medizin hat die Technologie schneller integriert als viele erwartet haben. Die rasante Entwicklung in der Medizin hat sogar den Urheber Hull überrascht. Doch wenn wir die folgenden Vorteile, die das 3D-Drucken mit

³Naturally Restoring the Heart Valve. *Xeltis*. <http://www.xeltis.com/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018.

sich bringt, in Betracht ziehen, ist die rasante Ausbreitung verständlich (Ventola 2014):

- *Personalisierung und Individualisierung* – 3D-Druck erlaubt maximale Freiheit in der Gestaltung,
- *Geringe Produktionskosten* – günstiger als traditionelle Produktionsmethoden bei kleinen Stückzahlen,
- *Schnelligkeit* – Produkte stehen in Stunden bereit anstatt in Wochen oder Monaten,
- *Demokratisierung und Zusammenarbeit* – geringe Infrastruktur und Materialkosten sowie einfache virtuelle Zusammenarbeit.

8.3 Anwendungsmöglichkeiten

Die heutigen Anwendungen fallen großteils in die folgenden Kategorien (Ventola 2014):

- Prothesen und Implantate,
- Gewebe- und Organherstellung,
- anatomische Modelle.

Prothesen- und Implantate

Wir können uns vorstellen, wie schwierig es ist „Standard-Prothesen“ herzustellen. Keine zwei Menschen sind gleich. Und doch musste bisher eine passende Hüftprothese oder Zahnprothese aus einer vordefinierten Auswahl bestimmt werden. Innerhalb einer Hüftoperation musste der Orthopäde enorm viel Zeit darauf verwenden,

die passende Gelenkpfannen- und Oberschenkelimplantate zu finden. Dafür setzte er verschiedene Proben ein, bis eine passte. 3D-Druck ermöglicht es nun, Prothesen in jeder erdenklichen Form herzustellen, als Einzelstück, vollkommen personalisiert. Bisher war das undenkbar.

So kommt heute 3D-Druck erfolgreich für Wirbelsäulen-, Hüft- oder Zahnimplantate zum Zug. Auch komplexere Strukturen, wie z. B. ein gesamter Unterkiefer aus Titanium, wurden bereits erfolgreich implantiert.

Der 3D-Druck bestimmt heute bereits die Herstellung von Hörgeräten. O'Brien zufolge werden bereits über 90 % aller Hörhilfen mit Unterstützung von 3D-Drucktechniken hergestellt. Dieser Wert dürfte sich in den nächsten Jahren noch weiter nach oben entwickeln. Da jeder Hörkanal eine individuelle Form besitzt und die Geräte ohnehin sehr klein sind, bietet sich die Verwendung von 3D-Drucktechniken für patientenspezifische Anpassungen an.

Es müssen nicht immer hochkomplexe medizinische Applikationen sein, die das Potenzial der 3D-Technik zeigen. Manchmal sind es auch recht einfache Anwendungen und Hilfen, die aus dem Drucker kommen. Als Wegbereiter der 3D-Optik gilt das hessische Unternehmen Framelapp, welches in Verbindung mit einem Optikernetzwerk kundenspezifische Brillen herstellen. In einer kleinen Manufaktur entstehen Brillen, die auf die Kopfform, die Sehstärke und Sehgewohnheiten bzw. Anforderungen des Kunden abgestimmt sind. Framelapp ist ein schönes Beispiel dafür, wie innovative

Kleinunternehmen einen ganzen Markt in Bewegung bringen⁴. Aktuell prüfen die in Europa dominierenden Optikerketten, ob und wenn ja in welcher Form sie ein vergleichbares Konzept einführen.

Letztlich erhält der 3D-Druck auch in der Zahnmedizin, über den Zahnersatz, bis zu den Zahnpfingen, rasch Einzug. Das Unternehmen Invisalign stellt heute bereits täglich über 50.000 Zahnpfingen mittels 3D-Druck her⁵. Dass es dafür kein großes Unternehmen braucht, hat ein Student aus den USA bewiesen. Um seine schlechte Zahnstellung zu korrigieren, hat sich Amos Dudley selbst an der Uni mittels 3D-Druck Zahnpfingen hergestellt und seine Zähne erfolgreich verschönert (O'Neal 2016).

Gewerbe- und Organherstellung

Erste 3D-Drucke sind längst im Menschen verbaut. Bislang wurden nicht nur Prothesen und Gelenke, sondern sogar Organe im menschlichen Körper durch eine Reproduktion ersetzt. Besondere mediale Aufmerksamkeit wurde der fünfjährigen Sunita (Name geändert), Tochter eines indischen Fischers von Palghat, Indien, zuteil. Das Mädchen litt unter einem Ventrikelseptumdefekt (VSD). Es handelt sich dabei um den häufigsten angeborenen Herzfehler, der durch einen Defekt in der Scheidewand

⁴FrameLApp, 3D Printed Eyewear. <http://www.framelapp.de/>. Zugegriffen: 7. Januar 2018.

⁵Invisalign. Die unsichtbare herausnehmbare Zahnschiene zur Zahnkorrektur (2018) Align Technologie. <https://www.invisalign.de/de/what-is-invisalign/Pages/What-Is.aspx>. Zugegriffen: 7. Januar 2018.

(Ventrikelseptum) zwischen den beiden Herzkammern gekennzeichnet ist. Dem Mädchen wurde 2016 ein künstliches, im 3D-Drucker erzeugtes Herz implantiert. Leider ist nicht bekannt, wie es dem Kind nach der OP ergangen ist (Scott 2016).

Einer der zentralen Vorteile der 3D-Drucktechnik: Die Druckerzeugnisse können Daten aus traditionellen Scan-Techniken wie MRT und Ultraschall als Grundlagen für den Druckprozess verwenden. Die zu ersetzenen Körperteile können bis auf Hundertstelmillimeter exakt produziert werden. Die Druckerzeugnisse können außerdem mit einer realistischen Farbgebung versehen werden.

Die bislang mit 3D-Drucktechniken erzeugten Organe sind aber noch von einer eher einfachen Struktur. Heute kämpfen Forscher insbesondere mit der Dicke der Druckergebnisse und der unzulänglichen Sauerstoffdurchlässigkeit. Hierfür existieren noch keine praktikablen Lösungen. Allerdings haben ein Team von Wissenschaftlern der renommierten Universitäten Sydney, Harvard, Stanford und des Massachusetts Institute of Technology vermeldet, dass ihnen die Herstellung eines durchströmbaren Kapillarnetzwerkes gelungen ist. Die zugrunde liegende Technik wurde bereits 2009 patentiert.

Eine der Herausforderungen besteht bislang noch in der Entwicklung von geeigneten Materialien, die für die additive Fertigung verwendet werden können. Ein Bericht der 3D Printing Industry zeigt, dass man hier bereits vielversprechende Wege beschritten hat. Forscher an der New Yorker Syracuse University konnten Materialien finden (zum Teil in Verbindung mit Drittmaterialien), die als

Gerüst für Zellzüchtungen und die Herstellung künstlichen Gewebes taugen (Albrecht et al. 2016).

Anatomische Modelle

Operateure profitieren von einem anderen Aspekt: Auf Grundlage von bestehenden Organscans können zur Vorbereitung von hochkomplexen Operationen wie einer Lebertranstransplantation im Vorfeld exakte Kopien erzeugt werden. Ein 3D-Druck einer Leber kann zur präoperativen Planung genutzt werden. So können heute auf radiologischen Bildern basierte 3D-Nachbildungen wichtiger Organe (z. B. der Leber) bereits vor der Operation gedruckt werden. Dem Operateur hilft der 3D-Druck, die räumlichen Verhältnisse und Wechselwirkungen zu verstehen. Er kann abnormale Strukturen analysieren, Größe von Gefäßen messen oder sich den besten Operationszugang suchen. Damit werden Operationen sicherer, schneller und genauer (Zein et al. 2013)⁶.

8.4 Aktuelle Forschungen und Entwicklungen

Einen interessanten Überblick über aktuelle 3D-Printing-Projekte bietet das US-amerikanische National Institute of Health mit der Plattform NIH 3D Print Exchange. Dort können Interessierte Details zu ihren biomedizinischen

⁶3D Printing. The Cutting Edge of Healthcare. *Formlabs*. <https://formlabs.com/blog/3D-printing-healthcare/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018.

Druckergebnissen publizieren. Die Schwerpunkte liegen bei Prothesen, neurowissenschaftlichen Modellen, Herzmodellen und Molekülnachbauten⁷.

Die 3D-Drucktechnik bringt nicht nur hochinteressante Möglichkeiten und Entwicklungen hervor, sondern könnte die gesamte Forschung und Entwicklung im medizinischen Bereich revolutionieren. Wissenschaftler an der Harvard-Universität haben z. B. einen 3D-Herzdruck auf einem Chip realisiert, der Tierversuche in der Zukunft überflüssig machen könnte (Burrows 2016). Organe auf Chips gedruckt können als Vorlage von normalem Gewebe dienen und eine echte Alternative zu Tierversuchen sein. Solche Systeme haben die Forscher aus Harvard bereits für Herzen, Lungen, Zungen und Darm hergestellt.

Trotz der steigenden Zahl an wissenschaftlichen Publikationen zum Einsatz der 3D-Technik in der Medizin, sind Wissenschaftler längst nicht sicher, was die Zukunft bringen wird. Aus Sicht von Gelinsky, Leiter des Zentrums für Transnationale Knochen-, Gelenk- und Weichgewebe-forschung und Mitglied der Redaktion des *Journal of 3D Printing in Medicine*, wirken drei treibende Kräfte auf den weiteren Entwicklungen (Gelinsky 2016):

- Entwicklung neuer Biomaterialien, die für den additiven Einsatz geeignet sind.
- Verbesserung der Zellintegration mit dem Ziel, die Verarbeitung zellbeladener Konstrukte und die klinisch relevante Größe zu verbessern.

⁷Collections. NIH 3D Print Exchange. <https://3dprint.nih.gov/collections>. Zugegriffen: 7. Januar 2018.

- Herstellung von komplexeren Konstrukten mit unterschiedlichen Materialien und/oder räumlich unterschiedlichen Zelltypen in kontrollierter Weise.

Entscheidende Fortschritte beim 3D-Druck im biomedizinischen Anwendungsbereich wird es durch die Verbesserung der Drucktechnik geben. Hier sind insbesondere Drucker zu nennen, die verschiedene Materialklassen, wie Metalle, Keramiken und Polymere, kombinieren. Damit lassen sich die verschiedensten Konstrukte für die Behebung unterschiedlichster anatomischer Defekte erstellen.

Gelinsky bewertet die Herstellung deutlich skeptischer als andere Experten. Seiner Einschätzung zufolge wird die Herstellung komplexer Organe bis auf Weiteres nicht möglich sein. Das wird erst in einigen Jahrzehnten realisiert werden. Auch andere Experten gehen davon aus, dass für den Druck von Organen noch 20 Jahre und mehr an Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig sind. Doch wie wir alle wissen, verlaufen Entwicklungen beim Durchbruch von neuen Technologien, die bisher nicht anwendbar waren, häufig schneller als erwartet.

Bioprinting, d. h. das Bedrucken mit biologischem Material, ist einer der wichtigsten Schwerpunkte des zukünftigen 3D-Drucks. Bislang konnten Probleme bzgl. der Viskosität, der Verarbeitbarkeit, der Formtreue und des Zellüberlebens noch nicht gelöst werden. Die Forschungen hierzu werden rund um den Globus mit Hochdruck vorangetrieben, um beispielsweise Trägermaterialien für menschliche Zellen zu entwickeln, die Zellkultivierungen ermöglichen. 3D-Gewebemodelle können außerdem

in der Krebsforschung, Medikamentenentwicklung und bei der patientenspezifischen Therapieplanung wertvolle Dienste leisten (Wang et al. 2014; Peng et al. 2017). Bio-Druck und insbesondere der 3D-Bio-Druck werden Ventola zufolge auch die roboterassistierte Chirurgie in der Zukunft radikal verändern. Wie weit wir mit 3D-Druck in der Medizin gehen werden, bleibt spannend. Die Erzeugung künstlicher Organe, Gefäße, Haut, Ohren oder sonstiger Körperteile sind wohl keine Fiktion.

8.5 4D-Drucken

Man muss kein Prophet sein, um die wachsende Bedeutung der dreidimensionalen Drucktechnik für unsere Gesundheit und das Gesundheitssystem vorherzusagen. 3D-Drucken mit all seinen Möglichkeiten ist längst noch nicht das Ende des technisch Möglichen. Die Druckergebnisse werden immer detaillierter, besser, günstiger und vielfältiger einsetzbar.

Forscher der Harvard University sind den nächsten logischen Schritt gegangen und haben Blumen erzeugt, die Bewegungen der natürlichen Prozesse nachahmen können. Durch das Hinzufügen einer weiteren Dimension, der Zeit, mit der sich die Positionsänderungen entlang der Zeitachse beschreiben lassen, sprechen die Forscher zurecht von 4D-Druck (Gladman et al. 2016; Lewis et al. 2016). Diese Technik wird in der Zukunft insbesondere für die Schaffung von synthetischen menschlichen Organen dienen. Man kann daher ohne Übertreibung von einer Revolutionierung der Medizintechnik sprechen.

Forscher des Harvard University Wyss Institute und der Harvard John A. Paulson, School of Engineering and Applied Sciences Inspired, bildeten zunächst die Transformation einer Blume ab. Auf dieser Grundlage erstellt das von Jennifer Lewis geleitete Team einen Bauplan von Pflanzenzellen, wobei die Bewegungen durch Cellulose-Fasern kopiert werden. Aus der Verbindung von Cellulose-Fasern mit Acrylamidhydrogel entsteht eine geleeartige Substanz.

Taucht man dieses Ergebnis in Wasser, beginnt es, sich zu drehen. Die Form wird dabei durch ein komplexes mathematisches Modell beschrieben. Die Leiterin des Projekts kann ihre Begeisterung kaum verbergen (Derla 2016): „Je nachdem, wie wir das Material tatsächlich drucken, biegt, dreht oder kräuselt sich das Blatt.“

Inspiriert wurde das Team um Lewis durch Mutter Natur und die typischen Faltbewegungen, mit denen Blumen ihre Blüten des Nachts zusammenfalten und sich bei Sonnenschein wieder entfalten. Der sogenannte 4D-Druck erweitert 3D-Druckobjekte um die Möglichkeit, sich im Laufe der Zeit zu verändern. Mit diesen zeitlichen Modifikationen lassen sich natürliche Prozesse kopieren und simulieren.

Dieser Ansatz erlaubt die Entwicklung von programmierbaren Materialien. Durch diesen multidisziplinären Ansatz werden sich in Zukunft gerade im medizinischen Bereich verschiedenste Körperteile und deren Funktionalitäten abbilden lassen.

8.6 Beschränkungen und Zukunftsfragen

Der primäre Einsatzbereich von 3D-Drucktechniken im Medizinbereich ist der Ersatz von Körperteilen oder die personalisierte Anpassung von *Dingen*, die mit dem Körper kompatibel sein sollen (Brillen, Prothesen, Knochenfragmente, Hörgeräte). Da jeder Mensch bildlich gesprochen in seiner eigenen Haut steckt, muss für jeden spezifischen Fall ein Unikat geplant, produziert und implantiert werden.

Allerdings stoßen bisherige Drucktechniken an eine technische Grenze: Es fehlt ihnen an der notwendigen Detaillierung, um auch kleinste Strukturen nachzubilden. Als größte Herausforderung für die Zukunft gilt deshalb die Erhöhung der Detailtreue. Manche Forscher träumen schon von exakten Abbildungen auf Zellebene. Hier kann in Zukunft die Nanotechnologie wertvolle Dienste leisten. Die Nachbildung des Blutkreislaufes mit den verschiedenen Blutgefäßen und mikroskopisch kleinen Kapillaren wird bis auf Weiteres das Maß aller Dinge bleiben. Miller bringt das Problem auf den Punkt:

Organe wie Lunge, Herz, Gehirn, Nieren und Leber sind von einem unglaublich eleganten, aber dennoch erschreckend komplexen Gefäßnetz durchdrungen, und noch ist kein Weg erkennbar, wie man diese Gewebestrukturen und die komplexen Verhältnisse reproduzieren könnte (Miller 2014).

Miller greift das Bild eines Gemäldes auf: Ein Replikat wird immer ein Replikat sein und nicht die Schönheit und Eleganz des Originals besitzen. Für den Patienten sind ästhetische und philosophische Aspekte zweitrangig. Für ihn ist entscheidend, ob eine Funktionalität seines Körpers auf diesem Weg wiederhergestellt werden kann – und sei es auch nur teilweise möglich.

Auch Chastain ist der Ansicht, dass Details wie ein Gefäßsystem bis auf Weiteres nicht mit 3D-Drucktechniken erstellt werden können: Sobald das aber gelinge, würde man, soweit es die Organreproduktion betrifft, die Büchse der Pandora öffnen (Hitt 2014).

Abgesehen von rein technologischen Aspekten und den unzweifelhaften Vorzügen der 3D-Drucktechnik sind verschiedene offenen Fragen bislang ungeklärt. Wie bei „Hype-Themen“ üblich, pendeln sich diese nach einer gewissen Zeit auf einem „hypebereinigten“ Niveau ein. Gartners Hype-Zyklus-Modell beschreibt diese Entwicklung⁸. Danach erreicht eine Technologie in der letzten Phase des Zyklus' ein Produktivitätsplateau, das weitgehend gehalten wird. Auf welchem Niveau sich dieses Plateau bewegt, ist in hohem Maße davon abhängig, ob sich die Technologie in Massen- oder Nischenmärkten etabliert. Man muss kein Prophet sein, um angesichts der unzähligen Anwendungsbereiche des 3D-Drucks, die weit über das Medizinische hinausreichen, zu prognostizieren, dass sich diese Technik auf einem hohen Produktivitätsplateau bewegen wird.

⁸McKenna, Tim: A. Sydney Gladman and others, „Biomimetic 4D Printing“, *Nature Materials*, 15.4 (2016), 413–18 <<https://doi.org/10.1038/nmat4544>>.

Dennoch gibt es verschiedene Fragen und Punkte, auch technische, für die bislang keine Antworten gefunden und Lösungen entwickelt wurden. Zur Beantwortung dieser Fragen sind innovative Lösungen und Ansätze gefragt. Das Interessante für kleine Denkfabriken: Hier ergeben sich beträchtliche Entwicklungsmöglichkeiten mit entsprechend hohem kommerziellen Potenzial. Bislang ungelöste Fragen betreffen die Sicherheit von 3D-Druckergebnissen. Mithilfe dieser Technik lassen sich Schusswaffen, Masterschlüssel und viele andere (zum Teil illegale) Werkzeuge erstellen. Auch im medizinischen Bereich ist Missbrauch denkbar. Es wäre naiv zu glauben, dass es nicht zu Skandalen, wie den minderwertigen Brustimplantaten aus Frankreich, kommt. Bei dem Skandal wurden mehr als 5000 vom TÜV Rheinland zertifizierte Implantate verarbeitet. Der Fall zeigt, wie komplex Haftungsfragen letztlich werden können (Bubrowski 2017).

Auch beim 3D-Druck ist damit zu rechnen, dass minderwertige medizinische Produkte auf den Markt kommen, bei denen weder die notwendigen qualitativen Standards erfüllt sind, noch deren Herkunft klar ist. Aktuell scheinen Regierungen rund um den Globus diese Problematik noch nicht erkannt zu haben, denn es gibt keine gesetzlichen Initiativen, diese Zustände zu regeln. Denkbar wäre allerdings die Schaffung einer unabhängigen Instanz, die Zertifikate für Produkte und Druckergebnisse vergibt – ähnlich wie bei der Vergabe von SSL-/TLS-Zertifikaten.

Ein weiterer Bereich ist bis heute ungeklärt: Patent- und Copyright-Aspekte. Das Patent auf die 3D-Drucktechnik gehört Hull. Die Herstellung von Anwendungen des 3D-Drucks unterliegt somit seit Jahrzehnten dem Patent-, Industriedesign- und Markenrecht. Bislang gibt es allerdings wenig Erfahrung, wie diese Rechte durchzusetzen und zu interpretieren sind. Da sich bei Patienten mit einer endlichen Dauer der Schutz meist auf proprietäre Herstellungsprozesse, Zusammensetzung von Materialien und Maschinen beschränkt, ist zu klären, welche Produktionen diesem Recht unterliegen und welche nicht. Auch das Copyright stellt ein Problem beim 3D-Druck dar. Ob und inwieweit Fragen des Urheberrechts relevant sind, ist ebenfalls ungeklärt.

Last but not least müssen Regulierungsbehörden geschaffen bzw. die Aufgabenbereiche bestehender Behörden und Institutionen erweitert werden, damit der Einsatz der 3D-Drucktechnik in geordneten Bahnen mit der notwendigen staatlichen und behördlichen Kontrolle erfolgt.

8.7 Ausblick

Aus Perspektive des Patienten ist die wichtigste Nachricht sicherlich, dass sich mit dem 3D-Druck individuelle Lösungen erstellen lassen, die optimal auf die spezifischen Gesundheitsaspekte abgestimmt sind. Die gute Nachricht für alle, die die verschiedensten Ausprägungen der Gesundheitssysteme in der einen oder anderen Form mittragen, ist die kostengünstigste Herstellung: Die Kosten

werden sich signifikant senken lassen und bisherigen Kostenexplosionen entgegenwirken.

Es ist außerdem davon auszugehen, dass eine spezielle Dienstleistungsbranche entstehen wird, die Ärzten, Krankenhäusern und Forschungseinrichtungen ihre Druckerkompetenz zur Verfügung stellt.

Dann bleiben noch die visionären Themen, z. B. wie 3D-Druck auf die biologische Bauanleitung anzuwenden ist, d. h. Erbgut (RNA und DNA) zu drucken. Damit wären wir, wie Chris Anderson es nennt, in der Do-It-Yourself-Biologie. Wir wollen hoffen, dass wir bevor dies Realität wird noch etwas Zeit haben (Anderson und Schmid 2013).

Quellen und Literatur

3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services. *3D Systems*. <https://www.3dsystems.com/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018

3D Printing. The Cutting Edge of Healthcare. *Formlabs*. <https://formlabs.com/blog/3D-printing-healthcare/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018

Albrecht, Lukas D., Sawyer, Stephen W., Soman, Pranav: Developing 3D Scaffolds in the Field of Tissue Engineering to Treat Complex Bone Defects (2016) *Mary Ann Liebert, Inc. publishers*. <http://online.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2016.0006>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Anderson, Chris, Schmid, Sigrid: Makers. das Internet der Dinge; die nächste industrielle Revolution (2013) *Hanser*, München

Bubrowski, Helene: EuGH-Urteil. Wohl kein Schmerzensgeld im Implantate-Skandal (2017) *FAZ.NET*, 16 Februar 2017, Sektion Gesellschaft. <http://www.faz.net/1.4880659>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Burrows, Leah: 3D-Printed Heart-on-a-Chip with Integrated Sensors (2016) *President an Fellows of Harvard College*. <https://www.seas.harvard.edu/news/2016/10/3d-printed-heart-on-chip-with-integrated-sensors>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Collections. NIH 3D Print Exchange. <https://3dprint.nih.gov/collections>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Cui, Xiaofeng, Boland, Thomas, D'Lima, Darryl D., Lotz, Martin K.: Thermal Inkjet Printing in Tissue Engineering and Regenerative Medicine (2012) *Recent Patents on Drug Delivery & Formulation*, 6.2, 149–55

Derla, Katherine, 4D-Printed Flowers May Pave Way To Creation Of Synthetic Organs (2016). <http://www.techtimes.com/articles/128154/20160127/4d-printed-flowers-may-pave-way-to-creation-of-synthetic-organs.htm>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

FrameLApp, 3D Printed Eyewear. <http://www.framelapp.de/>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Gelinsky, Michael: Current Research Directions in 3D Printing in Medicine (2016) *Journal of 3D Printing in Medicine*, 1.1, 5–7. <https://doi.org/10.2217/3dp.15.3>

Gladman, A. Sydney, Matsumoto, Elisabetta A., Nuzzo, Ralph G., Mahadevan, L., Lewis, Jennifer A.: Biomimetic 4D Printing (2016) *Nature Materials*, 15.4, 413–18. <https://doi.org/10.1038/nmat4544>

Grant, Land: Why These Citizen-Scientists Are Launching a Non-profit Maker Lab Focused on Health (2016) *Technically Media*. <https://technical.ly/brooklyn/2016/02/16/why-these-citizen-scientists-are-launching-a-nonprofit-maker-lab-focused-on-health/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018

Invisalign. Die unsichtbare herausnehmbare Zahnschiene zur Zahnkorrektur (2018) *Align Technologie*. <https://www.invisalign.de/de/what-is-invisalign/Pages/What-Is.aspx>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Hitt, Jack: If You Print It, They Will Come: Andrew Chastain Shares the Future of 3-D Printing (2014) *Virginia Quarterly Review*, 90.4, 12–18

Hoy, Matthew B.: 3D Printing: Making Things at the Library (2013) *Medical Reference Services Quarterly*, 32.1, 94–99. <https://doi.org/10.1080/02763869.2013.749139>

Lewis, Jennifer A., Mahadevan, L., Petty, Christopher: 4D Printing of Shapeshifting Devices (2016) *Wyss Institute*. <https://wyss.harvard.edu/technology/4d-printing/>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

McKenna, Tim: Gartner's Hype Cycle. *Seneca College*. <https://scs.senecac.on.ca/~timothy.mckenna/offline/GartnerHype-Cycle.htm>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Miller, Jordan S.: The Billion Cell Construct. Will Three-Dimensional Printing Get Us There? (2014) *PLoS Biology*, 12.6, e1001882. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001882>

Naturally Restoring the Heart Valve. *Xeltis*. <http://www.xeltis.com/>. Zugegriffen: 6. Januar 2018

O'Neal, Bridget Butler: 3D Printed Orthoprints: Sticking It to the Orthodontics Industry with a Smile (2016) *3DPrint.com*. <https://3dprint.com/124203/3d-printed-orthoprints/>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Patchen, Barss: Using 3D Printers to Create Prosthetic Limbs for Ugandans (2014) *University of Toronto News*. <https://www.utoronto.ca/news/using-3d-printers-create-prosthetic-limbs-ugandans>. Zugegriffen: 6. Januar 2018

Peng, Weijie, Datta, Pallab, Ayan, Bugra, Ozbolat, Veli, Sosnoski, Donna, Ozbolat, Ibrahim T.: 3D Bioprinting for Drug Discovery and Development in Pharmaceutics (2017)

Acta Biomaterialia, 57, 26–46. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.05.025>

Scott, Clare: 3D Printed Heart Model Gives a Five-Year-Old Girl a Good Chance for a Long Life (2016) *3DPrint.com*. <https://3dprint.com/128201/sunita-3d-printed-heart/>. Zugegriffen: 7. Januar 2018

Ventola, C. Lee: Medical Applications for 3D Printing. Current and Projected Uses (2014) *P & T: A Peer-Reviewed Journal for Formulary Management*, 39.10, 704–11

Wang, Chengyang, Tang, Zhenyu, Zhao, Yu, Yao, Rui, Li, Lingsong, Sun, Wei: Three-Dimensional in Vitro Cancer Models. A Short Review (2014) *Biofabrication*, 6.2, 22001. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/6/2/022001>

Whitaker, Matthew: The History of 3D Printing in Healthcare (2014) *The Bulletin of the Royal College of Surgeons of England*, 96.7, 228–29. <https://doi.org/10.1308/147363514X13990346756481>

Zein, Nizar N., Hanouneh, Ibrahim A., Bishop, Paul D., Samaan, Maggie Samaan, Eghtesad, Bijan, Quintini, Cristiano et al: Three-Dimensional Print of a Liver for Preoperative Planning in Living Donor Liver Transplantation (2013) *Liver Transplantation: Official Publication of the American Association for the Study of Liver Diseases and the International Liver Transplantation Society*, 19.12, 1304–10. <https://doi.org/10.1002/lt.23729>



9

Behandlung aus der Ferne: Telemedizin

Als Reverend John Flynn, ein Mitglied der presbyterianischen Kirche, im australischen Sydney 1928 offiziell den Aerial Medical Service (AMS) gründete, hatte er wohl kaum vermutet, dass seine Idee im darauffolgenden Jahrhundert das Gesundheitswesen revolutionieren könnte¹. Flynn wollte mit seinem Service den Missstand beheben, dass es nur zwei Ärzte für das zwei Millionen Quadratkilometer große Outback gab. Bereits ein Jahr vor der offiziellen Genehmigung hob am 2. August 1927 der erste fliegende Arzt ab. Heute ist Flynn's Service unter dem Namen *The Flying Doctors* weltweit bekannt.

¹History of the RFDS Logo. Royal Flying Doctor Service. <https://www.flying-doctor.org.au/about-the-rfds/history/rfds-logo/>. Zugegriffen: 3. Februar 2018.

Der Royal Flying Doctor Service (RFDS), so die exakte Bezeichnung, betreut nahezu alle gering besiedelten Gebiete Australiens. Der RFDS bedient ein Gebiet von etwa 7,15 Mio. km². Das entspricht in etwa zwei Dritteln der Gesamtfläche Australiens. Zum Vergleich: Die Bundesrepublik kommt auf 357.376 km². Die fliegenden Doktoren bewegen sich in einem Radius von 600 km, in dem etwa 16.000 Menschen leben; 90 % Aborigines. Die Ärzte können innerhalb von zwei Stunden jede Person in Australien erreichen und medizinisch versorgen.

Das Beispiel Australien zeigt eine Herausforderung in der medizinischen Versorgung: Sie ist über große Entfernungen nur mit erheblichem technischen und finanziellen Aufwand zu leisten. Die richtige Person am richtigen Ort zur richtigen Zeit – das ist in der Realität (noch) nicht machbar. Während wir in Europa häufig den Luxus haben, innerhalb von Minuten erreichbar zu sein, ist dies in vielen weniger dicht besiedelten Ländern nicht der Fall.

Mit Telemedizin ist medizinische Beratung orts- und zeitungebunden möglich. Aber auch Länder mit einer gut ausgebauten Infrastruktur können von dieser Technik profitieren. Im Sommer 2016 jubelte das Wallstreet Journal: „The revolution is finally here.“ (Beck 2016). Zwar spricht von der technologischen Seite nichts gegen eine flächen-deckende Einführung dieser Technik, aber noch gibt es eine Fülle an unbeantworteten Fragen von Patienten, Anbietern, Versicherungen und öffentlichen bzw. staatlichen Regulatoren.

9.1 Eine lange Tradition

Eigentlich ist Telemedizin ein alter Hut. Der erste Anwendungsfall der Telemedizin ist aus heutiger Sicht eher als ein banaler Vorgang zu sehen: Der britische Erfinder Alexander Graham Bell hatte sich bei der Beschäftigung mit seinem Patentobjekt *Telefonapparatur* am 10. März 1876 versehentlich Säure über den Anzug geschüttet (Demaerschalk et al. 2012). Bell nutzte die von ihm entwickelte Apparatur dazu, seinen Kollegen Thomas A. Watson zur Hilfe zu rufen. Watson befand sich zwar „nur“ im Nebenzimmer, eilte aber dennoch Bell unverzüglich zu Hilfe. Damit war der Anfang gemacht.

Seit diesem ersten medizinischen Notruf – von Fernruf kann man wohl nicht sprechen – sind mehr als 140 Jahre vergangen. In dieser Zeit hat sich das Werkzeug der Telemedizin so weit entwickelt, dass das Bodenpersonal der amerikanischen Raumfahrtbehörde *NASA* die medizinische Überwachung und -betreuung der Astronauten in der ISS übernimmt – und zwar in Echtzeit. Ein Beispiel hierfür: Bei einer ISS-Mission welche sechs Monate dauerte, klagte einer der Astronauten über starke Knieschmerzen. Offensichtlich ein komplexes Problem in einer Raumstation. Unter Anleitung der medizinischen Bodencrew haben dann die ISS-Astronauten ein Ultraschall des Knies durchgeführt, welches ein Radiologe am Boden beurteilte. So konnte ohne direkten physischen Kontakt das Problem gezielt gelöst werden (Menon et al. 2012). Wie in der Vergangenheit, wird die Raumfahrt auch in Zukunft medizinische Innovationen zusteuern.

Was genau ist Telemedizin? Die Telemedizin gehört zum Fachbereich Telematik, die die Bereiche Telekommunikation und Informatik im Gesundheitswesen verknüpft. Sie dient der Diagnostik und Therapie unter Überbrückung einer räumlichen oder auch zeitlichen Distanz (*asynchron*) zwischen Arzt und Patient². Sie kann auch der Konsultation zwischen zwei Ärzten dienen. In der Praxis kann die Telemedizin dazu dienen, dass sich Ärzte per Telefon, per E-Mail oder Webcam verbinden und ein medizinisches Problem diskutieren, eine Diagnose durchführen oder ein konkretes Behandlungskonzept abstimmen. Die Anwendung der Telemedizin kann in folgende Bereiche gegliedert werden: Telekonsultation, Telediagnose, Telebehandlung, Telemonitoring sowie Telecoaching respektive Teleausbildung. Meistens wird mehr als ein Thema abgedeckt.

Der Einsatz von Telemedizin in der Raumfahrt und bei Expeditionen zu entlegenen Gegenden dieser Welt, wie beispielsweise zum Nordpol, gelten als Wegbereiter dieser Technik. Und besser noch: Sie haben gezeigt, dass Telemedizin eine praktikable Erweiterung der klassischen ärztlichen Behandlung ist.

Der technologische Fortschritt, wie schnelle Internetverbindungen, Smartphones und sich verändernde Versicherungsstandards, sind wichtige Treiber des grundlegenden Wandels der Patientenbehandlung. Schon heute bieten viele niedergelassene Ärzte eine

²Wikipedia: Telemedizin (2018). <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Telemedizin&oldid=173171231>. Zugegriffen: 3. Februar 2018.

Telefonsprechstunde, in der Patienten mit dem behandelnden Arzt beispielsweise Laborberichte und das weitere Behandlungsprozedere abstimmen können. Die Telemedizin stellt die logische Fortsetzung dieser Entwicklung dar.

Dabei spielt die Telemedizin nicht nur bei der Patient-Arzt-Behandlung eine zunehmend wichtige Rolle, sondern auch beim zwischenärztlichen Austausch. Bei dem Projekt *Ärzte ohne Grenzen* gehen täglich Anrufe aus der ganzen Welt ein. Für das Ärzte-Netzwerk mit seinen 280 Experten auf der ganzen Welt ist Telemedizin ein wichtiges Informationssystem – gerade bei komplizierten Fällen. Dort haben die Ärzte 24/7-Unterstützung von internationalen Experten über alle Fachbereiche. Dies ist unerlässlich, da die Ärzte in den entlegensten Gebieten der Welt arbeiten und selbst nicht alle Fachbereiche abdecken³.

In den Wäldern außerhalb von St. Louis arbeiten Ärzte und Krankenschwestern rund um die Uhr in einem neuen Virtual Care Center. Das *Krankenhaus ohne Betten* bietet Fernunterstützung für Intensivstationen und Notaufnahmen. Überall dort, wo Not am Mann ist, bietet der telemedizinische Service Unterstützung. Dort steht nun ein 54 Mio. US\$ teures Krankenhaus, mit über 300 Angestellten, aber ohne ein einziges Bett. Das Team kommuniziert per Video-Call mit Patienten und

³Ärzte ohne Grenzen: Telemedizin in unseren Projekten. *MSE* <https://www.aerzte-ohne-grenzen.de/telemedizin-unseren-projekten>. Zugegriffen: 7. Februar 2018.

überwacht die Vitalparameter über verschiedene Geräte von zu Hause aus (Perpitone 2016).

Dabei scheint die Erfolgsquote, die derlei Dienstleistungen erzielen, fast zu schön, um wahr zu sein: Dank telemedizinischer Unterstützung konnte die durchschnittliche Aufenthaltsdauer von Intensivpatienten um 35 % reduziert werden. Sogar die Todesfälle sollen um 30 % gesenkt worden sein. Randy Moore, Präsident von Mercy Virtual, schwärmt: „Mithilfe von Telemedizin konnte mindestens 1000 Menschen das Leben gerettet werden.“ (Mercy 2017).

Bei Mercy arbeiten 330 Spezialisten im Dienst der Telemedizin. In dem kürzlich geschaffenen Gebäude ist modernes High-Tech-Equipment untergebracht. Bereits 2006 hat das Unternehmen mit *Mercy SafeWatch* eine Umgebung zur zusätzlichen Überwachung von Intensivpatienten entwickelt. Heute überwacht Mercy Patienten in 30 Intensivstationen in fünf US-amerikanischen Bundesstaaten. Das Unternehmen bietet mit seinem Dienst *Telestroke* eine weitere Innovation: Patienten mit Schlaganfallsymptomen können sich per Telemedizin von Neurologen begutachten lassen. Mercy zeigt, dass Telemedizin auch erfolgreich bei der Überwachung von chronisch kranken Patienten zu Hause nach dem Krankenhausaufenthalt eingesetzt werden kann.

Dabei ergeben sich interessante Anwendungsmöglichkeiten – gerade auch in Kombination mit anderen in diesem Buch beschriebenen Techniken. Beispielsweise mit IoT-basierten Sensoren, die ihre Daten in einer Cloud speichern, die anschließend womöglich mithilfe von Big Data-Technologien ausgewertet werden.

Zwar arbeitet man in der Forschung und Entwicklung seit den 1980er-Jahren an telemedizinischen Lösungen, doch erst allmählich setzt sich diese Technik durch. Laut der American Telemedicine Association erhielten 2015 mehr als eine Million Amerikaner eine telemedizinische Versorgung. Für 2016 wurde ein Wachstum von 30 % prognostiziert. Noch ist die Skepsis bei den Patienten und Konsumenten allerdings groß. Wie eine Umfrage von HealthMine unter 500 technikaffinen Personen ergab, haben 39 % noch nichts von Telemedizin und seinen Möglichkeiten gehört⁴. Auch die Zahl derer, die einen traditionellen Arztbesuch bevorzugen, ist mit 42 % groß. Was aber sagen die Ärzte zum Einsatz von Telemedizin? Auch die sind tendenziell eher zurückhaltend. HealthMine fand bei einer Befragung von 1500 Hausärzten heraus, dass gerade einmal 15 % Telemedizin in ihren Praxisalltag integriert haben. Die Bereitschaft zur Nutzung ist indes da, zumindest, wenn es wirtschaftlich Sinn macht: Bei einer angemessenen Honorierung sind 90 % bereit, Telemedizin in den Praxisalltag aufzunehmen.

9.2 Hürden und Skepsis

Die Zukunft von Telemedizin wird entscheidend davon abhängen, ob und wie die Regulierungsbehörden, Anbieter, Ärzte und Patienten diese Herausforderungen

⁴The 2016 HealthMine Digital Health Report (2016). <http://www.healthmine.com/sites/default/files/HealthMine%20Digital%20Health%20Tools%20Report%20May%202016.pdf>. Zugegriffen: 5. Februar 2018.

meistern. Die primären Ziele der Telemedizin sind die Verbesserung der Gesundheitsversorgung, der Qualität und die Zugänglichkeit zu medizinischer Versorgung. Außerdem sollen effiziente, benutzerfreundliche und umfassend akzeptierte Lösungen geschaffen werden.

Doch wie Untersuchungen zeigen, hinken Akzeptanz und Nutzung den technischen Möglichkeiten weit hinterher. Als der am schnellsten wachsende Anwendungsbereich der Telemedizin gilt die Patienten-Arzt-Kommunikation. Der medizinische Service ist dabei je nach Ausgestaltung des Services rund um die Uhr oder zu bestimmten Zeiten per E-Mail, Telefon, Webcam oder einer anderen Plattform erreichbar. Gerade die großen US-amerikanischen Firmen drängen auf die Verfügbarkeit solcher Angebote. Laut dem Wall Street Journal bieten bereits fast drei Viertel aller amerikanischen Großunternehmen entsprechende Angebote an – Tendenz steigend. Die Intension, die dahintersteckt, ist klar: Mitarbeiter sollen eine schnelle und kostengünstige Behandlung erfahren können, damit sie möglichst wenig Ausfallzeiten generieren. Die Nutzung wird vielen Firmen durch Angebote leicht gemacht, wie sie von Teladoc, Doctor on Demand und American Well offeriert werden. Natürlich sind die Unterschiede in der Krankenversicherung ein wesentlicher Treiber in den USA. Dort zahlen die Arbeitgeber einen Teil der Krankenkasse und sind somit daran interessiert, die Kosten über Zusatzservices zu senken. In Europa sind es meist die Kassen direkt, welche das Interesse haben, die Kosten ihrer Patienten über Telemedizin zu senken. Viele Kassen bieten Modelle an, wo eine Konsultation immer zuerst über

Telemedizin erfolgen muss, bevor man zum Arzt geht. Im Gegenzug sind die Versicherungsprämien tiefer.

Dass Telemedizin einfach, kostengünstig, patientenfreundlich und sogar wirtschaftlich sein kann, zeigt das Beispiel der Londoner Praxis DrEd. Schenkt man den Angaben des Unternehmens Glauben, so „besuchen“ an guten Tagen 2000 Patienten die virtuelle Praxis. Keinem der DrEd-Ärzte baumelt ein Stethoskop um den Hals – auch wenn die Homepage ein anderes Bild zeigt. Patienten müssen nicht stundenlang in einem Wartezimmer Platz nehmen. Kein Patient wird wochenlang auf einen Termin vertröstet.

Die Patienten nehmen einfach im virtuellen Sprechzimmer Platz, füllen einen Fragebogen aus und können anschließend einem Arzt ihr Anliegen schildern⁵. Gründer von DrEd ist der Deutsche David Meinertz, der aus einer Ärztefamilie kommt; sein Vater war Chefkardiologe am Hamburger Universitätsklinikum. Meinertz waren die Strukturen des deutschen Gesundheitssystems zu verkrustet. So gründete er sein virtuelles Behandlungszentrum, behandelt typische Krankheiten und verschreibt Rezepte für Heuschnupfen und Blasenentzündungen. Es existieren sogar geschlechterspezifische Behandlungsangebote. Der Patient zahlt je nach Aufwand zwischen 9 und 29 EUR. Das Rezept wird anschließend postalisch zugestellt oder geht auf Wunsch direkt digital an eine Versandapotheke.

⁵DrEd – Online Arzt. *Health Bridge Limited.* <https://www.dred.com/ch/>. Zugriffen: 5. Februar 2018.

Aus Sicht der Patienten eine tolle Lösung. Aber trägt sie auch dem medizinischen Anspruch auf eine optimale Patientenversorgung Rechnung? Das hängt im Wesentlichen vom Blickwinkel und der jeweiligen Patientensituation ab. Gewisse Patientengruppen eignen sich besser als andere. Im Allgemeinen können wir aber sagen, dass Telemedizin durchaus einen festen Platz in der Gesundheitsversorgung verdient hat. Nicht nur aus wirtschaftlichen Gründen, sondern auch aus der Sicht der Patientenversorgung.

Sturm gegen Angebote wie DrEd & Co. laufen Ärzteverbände und Interessensvertreter – insbesondere in europäischen Staaten. Unter dem Deckmantel der Qualität medizinischer Behandlung werden derlei Angebote torpediert – ähnlich wie beim Markteintritt der Online-Apotheke DocMorris. Besonders schwer haben es telemedizinische Angebote in Deutschland: Hier verhindert ein Fernbehandlungsverbot weitreichende Behandlungen. Allerdings ist die juristische Bewertung nach wie vor strittig. Außerdem fürchten Ärzte, dass ihnen angestammte Privilegien abhandenkommen. Manchen niedergelassenen Hausarzt dürfte die Einführung von Telemedizin in wirtschaftliche Bedrängnis bringen: In Deutschland bestellen beispielsweise nicht wenige Mediziner Patienten einmal pro Quartal ein, um die Quartalspauschale abrechnen zu können. Kein Wunder also, dass Telemedizin nicht bei allen Anklang findet.

Doch die Vorteile von Telemedizin liegen auf der Hand:

- Patienten und Ärzte haben 24/7-Zugang zu medizinischem Wissen aus allen Fachbereichen unabhängig von ihrer Mobilität und ihrer lokalen Infrastruktur.

- Telemedizin ist bequem. Patienten müssen nicht aus dem Haus gehen für einen Arztbesuch – wir alle wissen wie mühsam die Warterei in der Arztpraxis sein kann.
- Ärzte oder Krankenschwestern, die nur Teilzeit arbeiten wollen, finden mit der Telemedizin ein flexibles Modell, um von zu Hause aus zu arbeiten.
- Die Kosten für das Gesundheitssystem sollten tiefer sein durch verhinderte Konsultationen oder einen leichten Krankheitsverlauf, idealerweise, weil Patienten die Telemedizin früher als den Arzt vor Ort in Anspruch nehmen, und so weniger Komplikationen haben.

Nachteile sehe ich vor allem in der Situation, in der Patienten gezwungen sind, Telemedizin in Anspruch zu nehmen. Häufig ist der persönliche Austausch mit einer Vertrauensperson wichtig. In der Telemedizin kann es schwierig sein, mit derselben Person zu sprechen. Weiterhin kann es vorkommen, dass nicht alle körperlichen Symptome sichtbar sind. Über ein Videogespräch sieht der Arzt nicht, wie der Patient den Raum betritt, wie er sich setzt. Solch kleine Dinge sind aus meiner Erfahrung häufig sehr wichtig, um sich ein umfassendes Bild der Gesundheit des Patienten zu machen. Außerdem kann die Technologie zum Stolperstein werden. Ein 80-jähriger Patient wird nicht unbedingt auf Anhieb einen Facetime-Anruf bei einem Telearzt machen können.

9.3 Es braucht mehr als gute Ideen

In einer lesenswerten Analyse zum Thema *Telemedizin* bringt Wicklund das Problem auf den Punkt: „Telemedizin gewinnt immer noch nicht Herz und Verstand.“ (Wicklund 2016a). Die Technik hinkt meilenweit hinter ihrem Potenzial her. Das ist angesichts des allgemein attestierten Potenzials erstaunlich. Doch bei näherer Betrachtung treten zum Teil erhebliche Hemmnisse zutage. Die Kernprobleme kann man auch in Fragen fassen: Vertrauen die Patienten der Telemedizin? Wer zahlt überhaupt für Telemedizin-Dienstleistungen? Was zählt eigentlich zur Telemedizin und was nicht? Wie ist der Datenaustausch reguliert? Welche Regularien bestehen generell? Ist eine Fernbehandlung überhaupt zulässig? Darf länderübergreifend telemedizinisch beraten oder behandelt werden? Wie sind Haftungsfragen geregelt? Ein erhebliches Problem stellt dabei das Fehlen von grenzüberschreitenden Regelungen dar.

Wie eine Umfrage von Harris Poll zeigt, ist die Skepsis bei den meisten Patienten nach wie vor stark ausgeprägt. Zwar sind rund 60 % prinzipiell bereit, Telemedizin in Anspruch zu nehmen, doch gerade 16 % haben dies bereits getan. Patienten haben insbesondere Bedenken, ob die Krankenversicherungen die dafür anfallenden Kosten tragen. Auch sicherheits- und internetspezifische Aspekte erweisen sich als grundlegendes Hemmnis. Mehr als ein Drittel aller Befragten möchte nicht auf den persönlichen Kontakt zum Arzt verzichten. Doch es gibt durchaus auch Pluspunkte, die von den Patienten gesehen werden. Sie

schätzen insbesondere die Bequemlichkeit und den potenziellen Kostenvorteil.

Aus Patientensicht ist die Frage, wer die Kosten trägt, eine wichtige. In Europa hat man in einigen Ländern damit begonnen, Honorierungsfragen zu klären. In Deutschland existieren bereits Regelungen, was eine Videobehandlung ist und wie diese zu honorieren ist⁶. In Europa fehlt letztlich eine grenzüberschreitende Regulierung. Ohne diese werden wir weiterhin einen fragmentierten Markt sehen, mit Telemedizinanbietern spezialisiert auf einzelne Länder (Raposo 2016). 2017 hat die europäische Kommission eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, welche Vorschläge ausarbeiten soll, wie die EU einen einheitlichen digitalen Gesundheitsmarkt fördern kann. Bürger sollen grenzüberschreitend Zugang zu ihren Gesundheitsdaten haben und eine grenzüberschreitende Dateninfrastruktur soll gefördert werden (Gonzáles-Sancho 2014). Alles wichtige Voraussetzungen für die grenzüberschreitende Telemedizin.

Kompliziert sind die Verhältnisse auch in den USA. Dort haben 32 Bundesstaaten ein Paritätsgesetz unterzeichnet, das den Ausgleich von Leistungen über Bundesstaatsgrenzen hinweg ermöglicht. Auf Bundesebene sind verschiedene kleinere telemedizinische Dienste abgedeckt. Allerdings gilt diese Regelung nur für Begünstigte in ländlichen Gebieten und auch nur dann, wenn die Leistungen

⁶IWW Institut: Videosprechstunde – Neue EBM-Nrn. ab 01.04.2017 (2017) *Abrechnung aktuell*. <http://www.iww.de/aaa/kassenabrechnung/ebm-2017-video-sprechstunde-neue-cbm-nrn-ab-01042017-f102329>. Zugegriffen: 5. Februar 2018.

von einem Krankenhaus, einer Arztpraxis oder einer Klinik bezogen werden.

Natürlich entstehen auch für jeden Anbieter von fernmedizinischen Diensten Kosten. In der Regel sind Investitionen in Hard- und Software, aber auch in Personal und Know-how notwendig. Zudem entstehen laufende Kosten, die gedeckt werden wollen. Der Hausarzt, jede Gemeinschaftspraxis und jedes Krankenhaus muss daher eine Wirtschaftlichkeitsprüfung durchführen, die eine realistische Einschätzung der finanziellen Aspekte abgibt. Generell sind auch Fragen der Datenqualität zu beantworten. Ein behandelnder Arzt benötigt Vorgaben, welche Daten notwendig, zwingend und wünschenswert sind. Er benötigt Auskunft bzgl. der Zuverlässigkeit und Belastbarkeit der Informationen. Verschiedene Experten sehen den wichtigsten Einsatzbereich von Telemedizin beim Einholen von Zweitmeinungen. Diese hat in den meisten Staaten eine rechtlich geringere Relevanz. Aber auch hier fehlt es an entsprechenden Regularien.

Rechtliche und finanzielle Fragen

Entscheidend für die Akzeptanz von der neuen Technologie ist, dass die postulierte bzw. propagierte Wirksamkeit für alle Teilnehmer tatsächlich erzielt wird. Im Gesundheitswesen geht es nicht nur um die Gesundheit, sondern auch um viel Geld. Und die Daten zur Wirksamkeit von Telemedizin sind nicht immer positiv. Wir können sowohl für die Wirksamkeit als auch für eben das Fehlen der Wirksamkeit zahlreiche Studien finden. Wie eine großangelegte Studienanalyse zeigt, die die Wirksamkeit der Telemedizin-Nachsorge von Patienten mit

Bein- und Fußgeschwüren analysiert, sind die Ergebnisse für klinische Empfehlungen bislang unzureichend (Nordheim et al. 2014). Ein anderes Beispiel aus der Asthmbetreuung zeigt, dass die telemedizinische Versorgung ähnlich gute Effekte erzielt, wie die persönliche Arztbetreuung (Portnoy et al. 2016).

Einfacher ausdrückt: Ob Telemedizin auch tatsächlich medizinisch und wirtschaftlich Sinn macht oder nicht, ist nicht eindeutig. Diese Frage wird auch kaum umfassend beantwortet werden können, sondern für jeden Anwendungsbereich einzeln.

Die offenen Fragen rund um die Telemedizin stellen ein reiches Betätigungsfeld für innovative Start-up-Unternehmen dar, denn hier werden Lösungen benötigt, die etablierte Strukturen bislang nicht erbracht haben.

Letztlich wird aber die zukünftige Vergütung und Regulierung der Telemedizin entscheidend dafür sein, wie weit diese Teil unserer täglichen Gesundheitsversorgung wird. Die aktuell uneinheitliche Regulierung der Telemedizin ist ein wesentlicher Bremsfaktor für die weitere Ausbreitung. Kritisch betrachtet, basiert vieles in der Telemedizin auf Technologien die wir schon Jahre kennen. Das Telefon oder den Videocall gibt es seit Jahren. Lediglich die ans Internet angeschlossenen Geräte, welche drahtlos Daten sammeln und übertragen, sind neueren Ursprungs. Doch vielleicht schaffen es smarte Start-up-Unternehmen alternative Wege zu gehen.

Daten als Treiber der Telemedizin

Alexander Bells medizinischer Notruf ist historisch. Schaut man niedergelassenen Ärzten über die Schulter, so muss

man feststellen, dass Telemedizin selbst in Industrielanden noch weit von einem flächendeckenden Einsatz entfernt ist. Dabei bietet sie gerade auch im Zusammenspiel mit modernen IT-Dienstleistungen ein erhebliches Potenzial. Das McKinsey Global Institute sieht beträchtliches Potenzial von Telemedizin in Verbindung mit IoT-Techniken (Manyika 2013). Doch auch innovative Ideen haben es sehr schwer, wie das Beispiel Healthspot zeigt. Das Unternehmen plante, die USA innerhalb weniger Jahre mit einem Netz von mehr als 10.000 Gesundheitskiosks zu verknüpfen⁷. Diese Kioske sind Stationen, wo sich Patienten mit medizinischem Personal austauschen können. Die technologische Basis bildet eine von Dell entwickelte vierstufige Architektur.

Um eine möglichst breite Anwendungsvielfalt zu ermöglichen, verwendet Dells Plattform die Ebenen Datenquellen, Datenerfassung, Datenaggregation/Analyse und Datenvisualisierung/Business Intelligenz. Als Datenquellen können die verschiedensten medizinischen Geräte wie Waage, Stethoskop und Otoskop, aber auch Sensoren von IoT-fähigen Geräten verwendet werden. Diese Quelldaten werden über spezielle Gateways erfasst. Diese Erfassung kann am Arbeitsplatz oder über ein Smartphone erfolgen. Die Computing-Infrastruktur stellt die notwendigen Funktionen für die Aggregation der Daten und

⁷Intel: Optimierungen im Gesundheitswesen mit Telemedizin-Lösungen auf Basis des Internet of Things (IoT) (2014) Intel Corporation. http://i.dell.com/sites/doccontent/shared-content/data-sheets/de/Documents/intel-dell-healthcare-332064-final_de.pdf. Zugegriffen: 5. Februar 2018.

deren Analyse bereit. Hier kommen Cloud-Services und moderne Rechenzentren ins Spiel.

Die Speicherung, Aufbereitung und Analyse von medizinischen Daten bildet die notwendige Grundlage für Diagnosen und die Erarbeitung von Behandlungskonzepten. Auf Basis von handfesten Informationen können Ärzte und Pflegepersonal individuelle Maßnahmen einleiten. Einfache Fragestellungen können häufig bereits mit (Pivot-)Tabellen beantwortet werden. Je nach Analyseaufwand und Verwendungszweck kommen professionelle Analysewerkzeuge wie Hadoop zum Einsatz. Derlei Werkzeuge können sogar für das Anstellen von Prognosen genutzt werden.

Anhand eines Beispiels wird deutlicher, was exakt bei der Datenanalyse erfolgen kann: Das kongestive Herzversagen ist in den USA der häufigste Grund für die Wiederaufnahme von Patienten in ein Krankenhaus. Wiederaufnahmen innerhalb kurzer Zeitspannen von weniger als 30 Tagen deuten auf eine unzureichende medizinische Qualität hin. Außerdem verursachen sie erhebliche Kosten. Das von Dell entwickelte System kombiniert Telemedizin mit Remote-Monitoring. Das System sammelt verschiedenste Patientendaten, korreliert sie und beantwortet verschiedene Fragen bzw. gibt die notwendigen Hinweise:

- *Medikation:* Ist die Medikation optimal oder womöglich ursächlich für die erneute Behandlung?
- *Schlaf:* Schläft der Patient ausreichend?
- *Sport:* Bewegt sich der Patient ausreichend?

- *Ernährung*: Ist die Ernährung auf das Krankheitsbild abgestimmt?
- *Patientenvergleich*: Wie ist der Zustand des Patienten im Vergleich zu anderen?

Das System liefert den behandelnden Medizinern die notwendigen Informationen für eine optimale Behandlung. Da die Daten digital erfasst sind, können diese zudem einfach für Studien oder Forschungszwecke genutzt werden.

Trotz ihres innovativen Ansatzes hat das Unternehmen Healthspot im Jahr 2016 Konkurs angemeldet, nachdem nur 190 Stationen installiert wurden (Wicklund 2016). Der Stolperstein für Healthspot war, dass die Kioske schlichtweg zu groß waren. Somit kamen viele Abnehmer gar nicht infrage, wie z. B. Apotheken, welche häufig nicht den nötigen Platz haben. Auch in Europa gibt es Versuche, solche Gesundheitsstationen in Apotheken zu etablieren. So plant das Schweizer Telemedizinunternehmen Medgate 100 bis 150 solcher Minikliniken innerhalb von fünf Jahren in Betrieb zu nehmen⁸.

9.4 Die Telemedizin der Zukunft

Die Telemedizin gehört zweifelsohne zu den Anwendungsbereichen, in denen sich mit vergleichsweise überschaubarem Aufwand die Behandlungskosten reduzieren und

⁸Neues Versorgungsmodell. Mini-Kliniken bündeln Ärzte, Apotheken und Praxisassistentinnen (2017) *Medinside*. <https://www.medinside.ch/de/post/neues-versorgungsmodell-mini-kliniken-buendeln-aerzte-apotheker-und-praxisassistentinnen>. Zugegriffen: 8. Februar 2018.

die Behandlungsqualität signifikant optimieren lässt. Die Herausforderungen liegen dabei weniger im technologischen als im organisatorischen und rechtlichen Bereich.

Gleich, ob nun ein niedergelassener Arzt oder ein Krankenhaus sich für die Nutzung dieser Technik entscheidet: Beide benötigen Lösungen, die Datensicherheit und den Datenschutz gewährleisten, damit nicht telemedizinische Daten in die Hände Unberechtigter gelangen. Überall dort, wo die Einführung von umfangreichen Telemedizin-Diensten geplant ist, ist die Entwicklung einer Telemedizin-Strategie geboten, in der spezifische und messbare Unternehmensziele definiert werden müssen. Für Anbieter von Telehealth-Infrastruktur besteht die zentrale Herausforderung in der Bewältigung der Datenflut, die von Sensoren, Geräten und unterschiedlichen Endpunkten stammen. Auch die Integration der verschiedenen Daten stellt eine nicht unerhebliche Herausforderung dar.

Grundsätzlich bietet die Telemedizin aber eine einzigartige Möglichkeit, Bevölkerungsgruppen in medizinisch unzureichend erschlossenen Regionen Zugang zu Spezialisten zu gewähren. Dies ist nur eines der vielen Zeichen eines Trends resultierend aus den neuen Technologien – die Überwindung der örtlichen Trennung des Patienten und des Arztes. Die Medizin der Zukunft wird viel seltener aus einer physischen Sprechstunde im selben Raum mit dem Arzt kommen. Telemedizin, Telepräsenz und Virtual Reality werden hier eine tragende Rolle spielen. Wartezeiten werden kürzer, Kosten sinken und Zugang zu sonst nicht erschlossenen Spezialisten wird möglich sein.

Wahrscheinlich wird die Telemedizin in Zukunft weniger ein alleinstehendes Produkt sein wie heute, sondern vielmehr ein lückenlos integriertes Angebot innerhalb unserer täglichen Gesundheitsversorgung darstellen. Irgendwann werden unsere Kliniken und unsere Hausärzte die Möglichkeit anbieten, Fragen per Telemedizin zu beantworten, ohne dass wir mit einem anonymen Telearzt sprechen müssen. Und sobald wir bessere Möglichkeiten finden, von zu Hause aus unseren Körper zu messen, werden viel mehr Behandlungen ohne Arztbesuch möglich sein. Stellen wir uns vor, es gibt eine Bluetooth-Stethoskop, mit dem der Arzt unsere Herz- und Atemgeräusche übers Internet hören kann, eine Kamera oder eine App, mit der wir Bilder aus unserem Rachen schicken können oder ein Otoskop (Ohrenspiegel), mit dem wir drahtlos Bilder vom Ohr unserer Kinder an den Kinderarzt schicken könnten. All das wird möglich sein. Und der Arzt wird sich dann hoffentlich auf die schwierigen Fälle konzentrieren können, währenddessen die Patienten oder Eltern nicht für jedes Fieber gleich zum Arzt gehen müssen. Das Unternehmen Tyto hat hier bereits spannende Lösungen auf den Markt gebracht⁹. TytoHome™ ist eine Produktpalette für zu Hause und soll bei der Diagnose von Ohren, Rachen, Herz, Lungen, Bauch und Hautkrankheiten helfen. Das ganze Set kostet 299 US\$, soviel wie ein traditionelles Stethoskop. Die Technologien kommen also, jetzt braucht es neue Geschäftsmodelle, die das Ganze finanziell attraktiv machen.

⁹TytoHome™. Telehealth Platform. Telemedicine Monitoring System. *Tyto Care*. <https://www.tytocare.com/tytohome/>. Zugegriffen: 8. Februar 2018.

Quellen und Literatur

Ärzte ohne Grenzen: Telemedizin in unseren Projekten. *MSF* <https://www.aerzte-ohne-grenzen.de/telemedizin-unseren-projekten>. Zugegriffen: 7. Februar 2018

Beck, Melinda: How Telemedicine Is Transforming Health Care (2016) *Wall Street Journal*, 27 June 2016, section Life. <http://www.wsj.com/articles/how-telemedicine-is-transforming-health-care-1466993402>. Zugegriffen: 3. Februar 2018

Demaerschalk, Bart M., Raman, Rema, Ernstrom, Karin, Meyer, Brett C.: Efficacy of Telemedicine for Stroke: Pooled Analysis of the Stroke Team Remote Evaluation Using a Digital Observation Camera (STRokE DOC) and STRokE DOC Arizona Telestroke Trials (2012) *Telemedicine Journal and E-Health*, 18.3, 230–37. <https://doi.org/10.1089/tmj.2011.0116>

DrEd – Online Arzt. *Health Bridge Limited*. <https://www.dred.com/ch/>. Zugegriffen: 5. Februar 2018

González-Sancho, Miguel: Transformation of Health and Care in the Digital Single Market (2014) *Digital Single Market*. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/policies/ehealth>. Zugegriffen: 8. Februar 2018

History of the RFDS Logo. Royal Flying Doctor Service. <https://www.flyingdoctor.org.au/about-the-rfds/history/rfds-logo/>. Zugegriffen: 3. Februar 2018

Intel: Optimierungen im Gesundheitswesen mit Telemedizin-Lösungen auf Basis des Internet of Things (IoT) (2014) *Intel Corporation*. http://i.dell.com/sites/doccontent/shared-content/data-sheets/de/Documents/intel-dell-health-care-332064-final_de.pdf. Zugegriffen: 5. Februar 2018

IWW Institut: Videosprechstunde – Neue EBM-Nrn. ab 01.04.2017 (2017) *Abrechnung aktuell*. <http://www.iww.de/aaa/kassenabrechnung/ebm-2017-videosprechstunde-neue-ebm-nrn-ab-01042017-f102329>. Zugegriffen: 5. Februar 2018

Manyika, James, Chui, Michael, Bughin, Jacques, Dobbs, Richard, Bisson, Peter, Marrs, Alex: Disruptive Technologies. Advances That Will Transform Life, Business, and the Global Economy (2013) *McKinsey & Company*. <https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/disruptive-technologies>. Zugegriffen: 5. Februar 2018

Mercy: Mercy Virtual: Cracking the Nut of Complex Care (2017). <https://www.mercy.net/newsroom/2017-03-24/mercy-virtual-cracking-the-nut-of-complex-care/>. Zugegriffen: 7. Februar 2018

Menon, Anil S., Moynihan, Shannan, Garcia, Kathleen, Sargsyan, Ashot: How NASA Uses Telemedicine to Care for Astronauts in Space (2012) *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2017/07/how-nasa-uses-telemedicine-to-care-for-astronauts-in-space>. Zugegriffen: 7. Februar 2018

Neues Versorgungsmodell. Mini-Kliniken bündeln Ärzte, Apotheken und Praxisassistentinnen (2017) *Medinside*. <https://www.medinside.ch/de/post/neues-versorgungsmodell-mini-kliniken-buendeln-aerzte-apotheker-und-praxisassistentinnen>. Zugegriffen: 8. Februar 2018

Nordheim, Lena Victoria, Haavind, Marianne Tveit, Iversen, Marjolein M.: Effect of Telemedicine Follow-up Care of Leg and Foot Ulcers. A Systematic Review (2014) *BMC Health Services Research*, 14.1, 565. <https://doi.org/10.1186/s12913-014-0565-6>

Pepitone, Julianne: Mercy Hospital Is a \$54 Million Hospital without Any Beds (2016) *CNNMoney*. <http://money.cnn.com/2016/09/12/technology/mercy-hospital-virtual-care/index.html>. Zugegriffen: 7. Februar 2018

Portnoy, Jay M., Waller, Morgan, De Lurgio, Stephen, Dinalkar, Chitra: Telemedicine Is as Effective as in-Person Visits for Patients with Asthma (2016) *Annals of Allergy, Asthma & Immunology. Official Publication of the American College of Allergy, Asthma, & Immunology*, 117.3, 241–45. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2016.07.012>

Raposo, Vera Lúcia: Telemedicine. The Legal Framework (or the Lack of It) in Europe (2016) *GMS Health Technology Assessment*, 12, Doc03. <https://doi.org/10.3205/hta000126>

The 2016 HealthMine Digital Health Report (2016). <http://www.healthmine.com/sites/default/files/HealthMine%20Digital%20Health%20Tools%20Report%20May%202016.pdf>. Zugegriffen: 5. Februar 2018

TytoHomeTM.Telehealth Platform. Telemedicine Monitoring System. *Tyto Care*. <https://www.tytocare.com/tytohome/>. Zugegriffen: 8. Februar 2018

Wicklund, Eric: HealthSpot Files for Bankruptcy Liquidation (2016) *mHealthIntelligence*, <https://mhealthintelligence.com/news/healthspot-files-for-bankruptcy-liquidation>. Zugegriffen: 8. Februar 2018

Wicklund, Eric: Telemedicine Still Isn't Winning Hearts and Minds (2016a) *mHealthIntelligence*. <https://mhealthintelligence.com/news/telemedicine-still-isnt-winning-hearts-and-minds>. Zugegriffen: 5. Februar 2018

Wikipedia: Telemedizin (2018). <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Telemedizin&oldid=173171231>. Zugegriffen: 5. Februar 2018



10

Zwischen Fiktion, Wissenschaft und Wirtschaft: Nanomedizin

Es ist das Jahr 1966. Der US-amerikanische Fernsehsender NBC strahlt die erste von insgesamt 79 Episoden des Klassikers *Raumschiff Enterprise* aus. Seit dieser Zeit begleiten uns Captain Kirk, seine Crew und seine Nachkommen. Das Jahr 1996 war ein gutes Jahr für Science-Fiction-Fans. Einen Tag vor Heiligabend kam ein weiterer fiktiver Film in die deutschen Kinos: *Die phantastische Reise*. Der Film handelt von einer Gruppe Menschen, die sich samt einem U-Boot verkleinern und in einen aus dem Ostblock übergelaufenen tschechischen Wissenschaftler injizieren lassen. Dort sollen sie eine komplizierte Gehirnoperation vornehmen. 20 Jahre später wurde die Idee der Miniaturisierung in einem weiteren Science-Fiction-Film neu aufgelegt. Ende der 1980er-Jahre konnte man in *Die Reise ins*

Ich im Kino erleben, wie ein Mini-U-Boot verkleinert in den Körper eines Kaninchens injiziert wurde.

Auch in *Akte X* hatten derlei Technologien einen prominenten Auftritt – und zwar gleich zweifach: In der zehnten Folge der sechsten Staffel aus dem Jahr 1999 mit dem Titel *S.R. 819* werden Menschen mit Nanotechnologie infiziert. Hier dient die Technik dazu, die Menschen kontrollierbar zu machen. In dem Akte X-Roman *Antikörper*, der zwei Jahre zuvor erschien, entwickelt Nanotechnologie ein tödliches Eigenleben.

Was im letzten Jahrhundert wie Möglichkeiten aus einer fernen Zukunft erschien, wird langsam medizinische Realität. Die Science-Fiction-Filme weckten womöglich falsche Erwartungen und Hoffnungen, denn Menschen wird man nicht verkleinern oder vergrößern können. Aber es existieren bereits eine Fülle von Technologien, die Medizinern ein Vordringen in neue, winzige Dimensionen erlauben.

10.1 Nanotechnologie in der Medizin

Das griechische Wort *nano* ist zunächst einmal eine Maßeinheit, verändert aber seine Bedeutung bei der Verwendung als Präfix beispielsweise bei dem Begriff Nanometer. Dann beschreibt es einen Teil bzw. ein Vielfaches einer Maßeinheit. Bei einem Nanometer handelt es sich um eine Milliardstelmeter. Mathematisch ausgedrückt: 10^{-9} m. Oder anders geschrieben: 0,000000001 m. Ich selbst muss beim Versuch mir diese Größe vorzustellen, die Stirn runzeln. Ein Nanometer ist etwa 3- bis 4-mal so

groß wie ein Atom, oder 80.000 mal kleiner als die Dicke eines menschlichen Haares. Ein letzter Vergleich: Ein Virus ist meist 100 nm (abgekürzt: nm) groß bzw. klein. Wichtig aber ist zu verstehen, dass obwohl wir von winzigen Partikeln sprechen, Nanopartikel häufig größer sind als die Grundmoleküle von traditionellen Medikamenten. Ein *Small Molecule-Medikament* hat die Größe von ca. 1 nm. Biologische Wirkstoffe, wie z. B. Antikörper, haben eine Größe von ca. 10 nm (oder mehr) und sind somit auch im Nanometerbereich. Die Nanopartikel selbst bewegen sich im Bereich von 1 bis 1000 nm.

Seit den 1990er-Jahren erfährt das Präfix *Nano* in Verbindung mit den Begriffen Nanotechnologie und Nanowissenschaft viel mediale Aufmerksamkeit (Krukemeyer et al. 2015). Charakteristisch für den Einsatz der Nanotechnologie waren ursprünglich nicht so sehr die Verkleinerung von Objekten, sondern die Eingriffe in Materialen und deren Eigenschaften. Nanotechnologie steht zunächst für die Verbesserung und Optimierung von Stoffen, aber auch für die Synthese neuartiger Materialien mit maßgeschneiderten Materialeigenschaften. Diese Möglichkeiten, aber auch die Schaffung winziger medizinischer Geräte, die gezielt im menschlichen Körper eingesetzt werden, fasst man heute unter dem Oberbegriff Nanomedizin zusammen. Die Anwendungsmöglichkeiten sind dabei äußerst vielfältig. Rund um den Globus wird mit erheblichem finanziellen Aufwand an zukunftsweisenden Forschungs- und Entwicklungsfeldern gearbeitet. Nanotechnologien kommen heute bereits in vielen Bereichen zum Einsatz. Beispiele sind Beschichtungen, wie man sie in der Badkeramik oder bei

Autolacken findet. Allerdings ist ihre Verwendung und Produktion nicht unumstritten.

Auch in der Medizin existieren bereits verschiedene nanotechnologische Anwendungen. In der Krebstherapie werden beispielsweise Nanopartikel in sogenannten Hyperthermieverfahren verwendet, um mithilfe von Hitzeerzeugung Krebszelle gezielt zu töten¹. Auch die Pharmaindustrie nutzt die sogenannte Nanoskalierung von Wirkstoffen, um die Arzneimittelverträglichkeit zu optimieren. Aufgrund der vielfältigen Anwendungsbereiche spricht man deshalb auch von einer Querschnittstechnologie.

Vorteile und Anwendungsbereiche der Nanotechnologie

Die wichtigsten Vorteile, welche die Nanomedizin bringt, sind folgende (Wolfram 2017):

- *Multifunktionalität:* Mithilfe der Nanotechnologie können die Eigenschaften der Nanopartikel sehr vielseitig gestaltet werden (z. B. Löslichkeit, Größe, Oberflächenbeschaffenheit etc.).
- *Elektromagnetische Aktivität:* Diese kann entweder optisch, magnetisch, thermisch oder elektrisch sein.
- Andere Verstoffwechselung im Körper als traditionelle Substanzen.

Aber welche konkreten Anwendungsbereiche bietet die Nanotechnologie? Nimmt man die verschiedenen

¹NanoTherm®. MagForce AG. <http://www.magforce.de/en/produkte/nanotherm.html>. Zugegriffen: 28. Januar 2018.

Projekte, Entwicklungen und Forschungsarbeiten unter die Lupe, so kristallisiert sich eine Gruppierung der unterschiedlichen Instrumente und Anwendungsbereiche heraus (Baetke et al. 2015; Singh 2009; De Jon et al. 2008):

- *Wirkstofftransport:* Großes Potenzial wird der Nanotechnologie bei der Entwicklung von Transportsystemen attestiert. Durch entsprechende Systeme können Wirkstoffe von Nanopartikeln transportiert und zielgerichtet angewendet werden. Sie können die Oberfläche der Nanopartikel z. B. mit Liganden anreichern, die sich zielgerichtet an bestimmte Zellen binden. Das verspricht eine nebenwirkungsärmere Behandlung. Das Problem der unspezifischen Verteilung im Körper wird somit minimiert. Erste Medikamente befinden sich aktuell in der klinischen Erprobung. Die Vorteile der Nanopartikel für den Wirkstofftransport liegen vor allem auch in einer besseren Löslichkeit gegenüber vielen traditionellen chemischen Substanzen im menschlichen Körper. Krebstherapeutika sind häufig nicht wasserlöslich und müssen deshalb mit teilweise toxischen Lösungsmitteln kombiniert werden. Wir können diese nicht löslichen Krebstherapeutika in Nanopartikel laden, anstatt andere Lösungsmittel zu brauchen. Wir können sogar mehrere Krebsmedikamente in ein Nanopartikel laden.
- *Therapie und Wirkstoffe:* Die Entwicklung von neuen, nanoskopischen Wirkstoffen wird möglich. Konkret können beispielsweise maßgeschneiderte Moleküle „gebaut“ werden, die mit Viren in Wechselwirkung treten. Auf diesem Weg können Infektionsketten

unterbrochen werden. Auch Tumore könnten mit Nanoartikeln angereichert werden, um Tumorzellen abzutöten. Alternativ können Nanopartikel auch über ihre elektromagnetische Aktivität bei der Tumorbearbeitung eingesetzt werden.

- *Implantate und Biomaterial:* Wie bei der Badkeramik oder bei Autolackierungen können auch mit Nanotechniken strukturierte Oberflächen geschaffen werden, die beispielsweise für eine bessere Verträglichkeit sorgen oder eine höhere Lebensdauer aufweisen.
- *In-vivo-Diagnostik:* Forscher erhoffen sich im Zusammenspiel mit anderen Wissenschaften und Forschungsbemühungen, wie der Genomforschung und der Molekularbiologie, Krankheiten besser zu verstehen und deren Verlauf exakter nachvollziehen zu können. Die Wunschliste geht sogar so weit, Krankheiten vor ihrem eigentlichen Ausbruch zu erkennen. Die Multifunktionalität von Nanopartikeln ist auch hier besonders praktisch. So kann man beispielsweise Nanopartikel mit elektromagnetischen Eigenschaften versehen und mit speziell an Tumore gerichteten Molekülen. So könnte Krebs viel früher und genauer diagnostiziert werden. Auch könnten so bisherige Verfahren viel sensitiver werden und neue Verfahren, z. B. die Photoakustische Tomografie (PAT), angewendet werden (National Cancer Institute 2017).
- *In-vitro-Diagnostik:* Für die effiziente Gestaltung von diagnostischen Laboruntersuchungen bietet die Nanotechnologie verschiedenste Möglichkeiten. So ist beispielsweise die Entwicklung von winzigen Laboreinheiten denkbar, die Standarduntersuchungen

durchführen und die Ergebnisse drahtlos übermitteln. Man spricht in diesem Kontext auch von Lab-on-a-chip. Gold-Nanopartikel könnten auch Teststreifen, welche wir heute für Schwangerschaftstests zu Hause brauchen, für Krebs anwendbar machen. Bei Krebs müssen kleinste Konzentrationen gemessen und dann auf dem Teststreifen für das Auge sichtbar gemacht werden. Dies könnte durch diese Goldpartikel, z. B. im Bereich Prostatakrebs, möglich werden, wie die Forschung von Xiaohu Xia von der Michigan Technological University zeigt².

Allgemein ist die Erwartungshaltung an die Nanomedizin hoch. Experten und Mediziner gehen von entscheidenden Neuerungen in allen Bereichen aus. Einigkeit besteht unter Fachleuten darin, dass die Grenzen des technisch Machbaren immer weiter in den Nanokosmos verschoben werden. So unvorstellbar klein die Dimensionen auch sein mögen, so unvorstellbar scheinen heute die Möglichkeiten der Nanotechnologie. Nicht nur in der Theorie sind die Aussichten glänzend. Auch in der medizinischen Praxis kann die Nanotechnologie bereits mit beachtlichen Ergebnissen aufwarten. Am Bundeswehrkrankenhaus Berlin und der Charité Berlin wurden 150 Patienten mit schwer- oder inoperablen Hirntumoren erfolgreich mit dieser Technik behandelt. Konkret wurden minimalinvasiv etwa

²Michigan Technological University: Test Strips for Cancer Detection Get Upgraded with Nanoparticle Bling (2017) *ScienceDaily*. <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/09/170913193131.htm>. Zugegriffen: 29. Januar 2018.

20 nm große Eisenoxidpartikel direkt in das Tumorgewebe injiziert. Anschließend erzeugten elektromagnetischer Wechselfelder Wärme, die Tumorzellen angriffen und zerstörten (Budach 2011).

Bei aller Euphorie stellt sich die Frage, ob überhaupt etwas gegen den Einsatz von Nanomedizin spricht. Soweit es die Beurteilung von tatsächlichen Risikofaktoren betrifft, steckt die Wissenschaft noch in den Kinderschuhen. Bislang weiß man nicht, welche Problem sich etwa beim Einsatz von Auslieferungsmechanismen tatsächlich ergeben können. Auch ist mit Zerfalls- und Zersetzungproblemen zu rechnen. Noch weiß niemand exakt, wie Nanopartikel im menschlichen Körper wirken. Es ist auch ungeklärt, ob nichtauflösbare Substanzen andere gesundheitliche Probleme oder chemische Reaktionen auslösen. Kritische Stimmen warnen auch vor sogenannten Partikelaggregationen: Nanoteilchen können sich beispielsweise durch physikalische Kräfte „verklumpen“ und in der Folge Gefäße verstopfen (Paddock 2012).

10.2 Nanotaxi, bitte!

Das kennt jeder von uns: Wenn wir ein Medikament gegen Kopfschmerzen oder andere Beschwerden einnehmen, so dauert es, bis dieses seine Wirkung entfaltet. Manchmal wirkt es, ein anders mal nicht. Ob es die gewünschte Wirkung entfalten kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab.

Damit ein Medikament an der gewünschten Position im Körper wirken kann, muss es verschiedene Barrieren überwinden. Bei äußerlichen Anwendungen ist das zunächst einmal die Haut. Auch die Bronchien der Lunge besitzen einen solchen Schutzmechanismus. Unser Gehirn wird durch eine spezielle Blut-Hirn-Schranke vor dem Eindringen unerwünschter Stoffe geschützt. Diese Barrieren übernehmen die Rolle eines Türstehers und prüfen, welche Stoffe hineindürfen und welche nicht. So schützen sie unsere Organe vor Viren und Schadstoffen – und auch vor Medikamenten. Doch künstlich erzeugte Nanoteile erkennen diese Schutzmechanismen häufig nicht – und lassen sie daher passieren. Mediziner und Pharmazeuten machen sich diesen Umstand zunutze und umgehen den körpereigenen Schutz. So kann ein Nanopartikel hergestellt werden, welches sich mit Wassermolekülen zudeckt und so dem Immunsystem vorenthalten bleibt. Ein Beispiel hierfür ist das erste von der amerikanischen Gesundheitsbehörde zugelassene Nanomedikament Doxil® gegen Krebs (Barenholz 2012).

Konkret bedient man sich dabei eines effektiven Tricks: Man erzeugt Nanokügelchen, die als Transporter des Wirkstoffs dienen und diesen punktgenau in das krankhafte Gewebe transportieren, indem an der Oberfläche der Nanopartikel gewebsspezifische Liganden angebracht werden. Dieser Ansatz ist längst keine Theorie mehr, sondern wird bereits erfolgreich klinisch getestet. Weltweit federführend in der medizinischen Nanotechnologie sind auch einige deutsche Forscher und Entwickler. Am Saarbrücker Helmholtz-Institut für Pharmazeutische Forschung arbeitet Prof. Claus-Michael Lehr, Inhaber des Lehrstuhls für

Biopharmazie und Pharmazeutische Technologie, seit geraumer Zeit an entsprechenden Lösungen³.

Lehrs Nanotaxi kann dabei nahezu beliebige Medikamente transportieren. Der Saarbrücker Wissenschaftler vergleicht die Nanotechnologie gerne mit einem Transportsystem oder Taxi: „Ob diese Nanomedizin gegen Krebs, Alzheimer oder anderes helfen soll, ist eine Frage des Wirkstoffs. Allerdings macht es einen Unterschied, ob man ein Krebsmedikament oder Gentherapeutika transportiert.“ (Reuning 2016). Lehr weist außerdem darauf hin, dass es einen Unterschied macht, ob die Nanomedizin beispielsweise über die Haut oder per Inhalation aufgenommen werden soll. Lehr und sein Team verfolgen einen Ansatz, der sich von herkömmlicher Krebstherapie unterscheidet: Statt die Antikrebspartikel in harten Eisenoxidkapseln zu transportieren, verwenden die Forscher weiche, resorbierbare Materialien, die der Körper nach einer gewissen Zeit abbaut. Somit verbleiben keine unerwünschten Rückstände, die womöglich für Folgeschäden ursächlich sein könnten. Die Nanoteilchen sollen nicht nur als Vehikel dienen, sondern auch keine Spuren im Körper und in der Natur hinterlassen. Als Trägermaterial hat sich in Tests der Biokunststoff Polymilchsäure bewährt, der seit Jahren in der Chirurgie als Nahtmaterial erfolgreich eingesetzt wird. Das Team um Lehr experimentiert mit einem weiteren Stoff: Chitosan. Dabei handelt es

³Lehr, Claus-Michael: Biopharmazie und Pharmazeutische Technologie (2016) Universität des Saarlandes. <https://www.uni-saarland.de/lehrstuhl/lehr-lab.html>. Zugegriffen: 29. Januar 2018.

sich um eine leicht chemisch modifizierte Form des Chitins, ein wesentliches Element von Insektenpanzern und Krabbenhüllen. Auch bei Pilzen ist Chitin ein wichtiges Zellenwandmaterial.

Einer der zentralen Vorteile dieses Ansatzes: Die Nanopartikel können andere Wege in den Körper nehmen. Die Saarbrücker Pharmazeuten haben beispielsweise eine Schutzimpfung entwickelt, die nicht mehr per Spritze, sondern als Creme oder Salbe über die Haut aufgenommen wird. Die Nanoteilchen können problemlos die Hautbarriere nehmen und dennoch eine Immunreaktion hervorrufen. Großes Potenzial sieht Lehr in der Herstellung von Impfsalben für Entwicklungsländer. In der Nanoform kann der Impfstoff stabil gelagert und transportiert werden – auch ohne jegliche Kühlung. Die optimale Größe solcher Partikel liegt Lehr zufolge bei 200 bis 300 nm, da sie so optimal in den Schaft zwischen Haut und Haar passen (Reuning 2016).

Vielversprechende Forschung wird aktuell auch auf dem Gebiet von Exosomen betrieben. Diese „Bläschen“ agieren als universeller Signalübermittler zwischen Zellen respektive Geweben. Das heißt, Exosomen sind die SMS des Körpers. Mittels Nanotechnologie versucht man diese nachzubauen und mit therapeutischen Stoffen zu versehen. So könnte man in den Zielgeweben sehr zielgerichtet Medikamente platzieren (Syn et al. 2017).

Weltweit forschen Universitäten an neuen Methoden, wie Nanopartikel Wirkstoffe mit weniger Nebenwirkungen an ihren Bestimmungsort bringen. Doch der Hype ist etwas abgeflacht. Die ersten Publikationen zum Thema *Drug Delivery Nanoparticles* stammen aus 1986.

Damals war es genau eine Publikation. Den Höhepunkt haben wir im Jahr 2015 erreicht – seither ist die Zahl der Publikationen leicht rückgängig. Das hängt wahrscheinlich auch damit zusammen, dass sich nun die Anwendbarkeit in der Realität beweisen muss und viele anfängliche Ideen nicht machbar sind⁴.

10.3 Die Tumor-Kocher

Eine von der Öffentlichkeit kaum wahrgenommene Revolution stellt die von Andreas Jordan an der Berliner Charité entwickelte Krebstherapie dar (Brettin 2000). Jordan gilt als Pionier der Nanomedizin. Jordans Ansatz umgeht ein Problem der herkömmlichen Strahlen- und Chemotherapie: Manche Tumore wehren sich gegen die Behandlung und entwickeln sogar Reparaturmechanismen, die beispielsweise Strahlenschäden reparieren.

Das von Jordan und seinen Kollegen entwickelte Verfahren eignet sich insbesondere zur Behandlung von schwer oder nicht zugänglichen Tumoren. Dabei wird der Schädel mit einem kleinen Bohrloch geöffnet und dann bringen feine Zwei- bis Drei-Millimeter-Sonden die Metallblättchen in den Tumor ein. Diese Art des Eingriffs ist nicht mit großen Gehirnoperationen vergleichbar. Der Clou des Ganzen: Der Operateur spritzt die Eisenoxidpartikel direkt in den Tumor; da die Teilchen

⁴Nanoparticles Drug Delivery – PubMed – NCBI. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>. Zugegriffen: 29. Januar 2018.

eine spezifische Beschichtung besitzen, werden diese nur von den Tumoren und nicht von gesundem Gewebe aufgenommen. Nach der Injektion werden die Patienten, die sich in einer Röhre befinden, die an ein CT-Gerät erinnert, einem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt, das 100.000 Mal pro Sekunde die Polarität ändert. Durch das Wechselfeld werden die Teilchen in Schwingungen versetzt und erhitzen sich. Bei einer Temperatur von ca. 45 Grad werden die Schutzmechanismen der Krebszellen deaktiviert. Erhitzt man das Gewebe weiter auf rund 70 Grad, wird das Tumorgewebe regelrecht verkocht. Und all das, ohne das darumliegende gesunde Gewebe zu verletzen. Auch der Aufwand gegenüber klassischen Gehirnoperationen ist deutlich geringer. Eine Einzelbehandlung dauert in etwa eine Stunde. Wie viele Behandlungen notwendig sind, ist von der Art und Größe des Tumors abhängig.

Seit 2010 ist dieses Verfahren für die Behandlung von Gehirntumoren in Europa zugelassen. Eine Studie bei Patienten mit wiederkehrendem bösartigem Gehirnkrebs Glioblastoma Multiforme konnte zeigen, dass Patienten nach der Behandlung deutlich länger lebten (Maier-Hauff et al. 2011).

Aktuell laufen Studien und Tests zur Behandlung anderer Krebsarten, allen voran Prostatakrebs. Experten gehen heute davon aus, dass sich diese Technik zur Behandlung bei fast allen Gewebetumoren anwenden lässt, die nicht größer als fünf Zentimeter sind.

10.4 Die Suche nach der magischen Kugel

Seit mehr als einem Jahrhundert träumen Mediziner von einer magischen Kugel, die das Problem der Wirkstoffverteilung im menschlichen Körper löst. Wenn wir ein Medikament einnehmen, dann erreicht nur ein Bruchteil des Wirkstoffes sein Ziel. Die Idee der magischen Kugel, die das Medikament exakt an den Bestimmungsort liefert, ist bereits über 100 Jahre alt. Wir verdanken dieses Konzept dem Medizinnobelpreisträger Paul Ehrlich (Kaufmann 2008). Ehrlich begründete die moderne Arzneimittelforschung und gilt als letzter Universalmediziner. Seit 1913 arbeiten Mediziner und Pharmazeuten an der Lösung dieses Problems. Heute scheint die Lösung dank der Nanomedizin in greifbare Nähe gerückt zu sein.

In den 1960er-Jahren entdeckten britische Forscher, dass seifenartige Substanzen im Wasser kleine Klumpen und kugelförmige Ansammlungen bilden. Diese Kugelchen erzeugen eine Schutzhülle, die einer tierischen oder pflanzlichen Zellmembran ähnelt. Das Interessante an diesen Konstrukten: Sie sind wesentlich kleiner als lebende Zelle. Bei genauerer Betrachtung stellten die Forscher fest, dass es sich um Nanoobjekte handelte. Heute kennt man dieses Phänomen unter dem Begriff der Liposomen (Bangham 1995). Sie können dank ihrer Eigenschaften gut als Träger von medizinischen Wirkstoffen genutzt werden.

Erst in den 1970er-Jahren nahmen Wissenschaftler diese Erkenntnis wieder auf und machten sich an die

Entwicklung der „Zauberkugeln“. Es dauerte noch einmal eine Dekade, bis Arzneimittel mit einer liposomalen Zubereitung auf den Markt kamen. Wissenschaftler lernen dabei eine Menge über die Art und Weise, wie ein Transportsystem beschaffen sein muss, damit Wirkstoffe das gewünschte Organ erreichen. Heute weiß man, dass zwei Oberflächeneigenschaften den Weg eines Nanopartikels entscheidend bestimmen: Größe und Beschaffenheit.

Teilchen mit einer wasserliebenden Oberfläche verbleiben länger im Blutkreislauf und haben somit mehr Zeit, erkrankte Zellen ausfindig zu machen. Lipophile Objekte sind eher fettliebend und weisen kürzere Verweilzeiten auf. Die Verweildauer im Blut spielt bei der Krebstherapie eine wichtige Rolle. Tumore haben die Eigenschaft, das umliegende Gewebe zu verändern. Insbesondere wuchern Adern, damit der Tumor seinen Energiehunger stillen kann. Aus diesem Grund sind Tumore auch in der Regel sehr gut durchblutet, weisen aber auch verhältnismäßig viele Defekte und undichte Stellen in den schnellwachsenden und unreifen Gefäßen auf.

Heute versucht man, die Schwachstellen für das Eindringen von Nanopartikeln zu nutzen. Allerdings muss der Wirkstoff auch in die Zellen eingebracht werden. Die Tumorzellen tragen auf ihrer Oberfläche spezifische Moleküle, die man sich wie eine chemische Visitenkarte vorstellen kann. Ein Forscherteam der Xiamen Universität in China hat nun eine *biomimetic theranostic ligand-targeted nanoplatform based on bio-functionalized liposome-like nanovesicles (BLNs) containing protein/peptide ligands* entwickelt. Auf Deutsch: Liposomenartige synthetische Moleküle mit

spezifischen Bindungsmolekülen an der Oberfläche, welche gezielt Tumorzellen erkennen können (Dumé 2018). In Laborversuchen konnten die Forscher an Krebszellen zeigen, dass diese Technik Chemotherapie viel effektiver an Krebszellen verabreicht als das weiter oben beschriebene, bereits zugelassene Doxin®. In Zukunft könnte uns das helfen, die hochtoxischen Chemotherapeutika gezielt einzusetzen, um damit die Schäden an den sich schnell-teilenden Geweben, wie den Haaren oder der Schleimhaut, zu lindern und somit neue Möglichkeiten in der Tumorthерапie zu eröffnen.

10.5 Nanobots gehen auf Patrouille

Die Nanotechnologie hat in den vergangenen Jahren sehr beachtliche Fortschritte gemacht. Insbesondere bei der Behandlung von Tumoren sind die bisherigen Ergebnisse sehr vielversprechend. Bis sich allerdings intelligente Kleinstcomputer und Roboter durch unseren Körper bewegen, wird noch einige Zeit vergehen. Weitgehend unbekannt ist außerdem die Wirkung von künstlichen Nanoteilchen auf den Menschen und die Umwelt. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Die Zukunft verspricht auf jeden Fall spannende Ergebnisse. Vor allem weil die Nanotechnologie häufig auch bereits bestehende Technologien und Ansätze sicherer, genauer oder potenter macht, anstatt alles von Grund auf neu erfinden zu müssen.

Was wir bisher beschrieben haben, liegt größtenteils nicht in der entfernten Zukunft, sondern wird die

Klinik und damit den Patienten in den nächsten Jahren erreichen.

Doch wie realistisch ist die Aussicht, dass in der Zukunft kleinste Nanorobots oder Nanobots unsere Krankheiten erkennen und selbst behandeln werden?

Diese Nanobots könnten in gar nicht so ferner Zukunft eine vielversprechende Rolle spielen. Forscher sehen die Anwendungen in der Erkennung und Elimination von z. B. Krebszellen. Auch die Möglichkeit Nanobots als Transporter von Sauerstoff im Blut wurde getestet. So können diese *Respirozyten* über 200 Mal mehr Sauerstoff transportieren als natürliche rote Blutzellen. Sie könnten auch als *Mikrobiotoren* agieren und fremde Organismen, z. B. Bakterien oder Viren, zerstören. Nanobots könnten sogar irgendwann Körpergewebe reparieren (Ahmad und Faiyazuddin 2016).

Das dies nicht erst in mehreren Dekaden Realität wird, haben die Forscher im Shawn Douglas vom Wyss Technology Development der Harvard University und Ido Bachelet von der Faculty of Life Sciences and the Nano-Center der Bar-Ilan University in Israel gezeigt⁵. Sie haben mittels Origami-Technik Nanobots aus DNS-Molekülen gebaut. Diese klammerartigen Strukturen binden sich an ganz spezifische Zellen, z. B. Krebszellen, und öffnen sich nur, wenn ganz bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Dann schütten sie die Information aus, dass sich

⁵Puiu, Tibi: Nanorobots Made out of DNA Seek and Kill Cancer Cells (2017) ZME Science. <https://www.zmescience.com/medicine/nanobots-dna-origami-seek-kill-cancer-cells-32143/>. Zugriffen: 30. Januar 2018.

die Krebszelle selbst zerstören soll. Mit dem Experiment konnten sie sehr erfolgreich im Labor Leukämiezellen abtöten, ohne jegliche körpereigene Zellen anzugreifen. Wann genau Nanobots in unserem Körper auf Patrouille gehen werden, werden wir nach den ersten klinischen Versuchen am Menschen erfahren. Damit ist wahrscheinlich in den nächsten fünf Jahren zu rechnen. Gemäß Forschern der Cambridge University könnte damit der medizinische Fortschritt von Jahrzehnten erreicht werden. Nicht nur könnten diese Krebs bekämpfen, sondern auch unser Leben deutlich verlängern (Sky 2018).

Quellen und Literatur

Ahmad, Usama, Faiyazuddin, Md: Smart Nanobots. The Future in Nanomedicine and Biotherapeutics (2016) *Journal of Nanomedicine & Biotherapeutic Discovery*, 6.1, 1–2. <https://doi.org/10.4172/2155-983X.1000e140>

Baetke, Sarah C., Lammers, Twan, Kiessling, Fabian: Applications of Nanoparticles for Diagnosis and Therapy of Cancer (2015) *The British Journal of Radiology*, 88.1054, 20150207. <https://doi.org/10.1259/bjr.20150207>

Bangham, Alec D.: Surrogate Cells or Trojan Horses. The Discovery of Liposomes (1995) *BioEssays. News and Reviews in Molecular, Cellular and Developmental Biology*, 17.12, 1081–88. <https://doi.org/10.1002/bies.95017>

Barenholz, Yechezkel: Doxil® – the First FDA-Approved Nano-Drug. Lessons Learned (2012) *Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society*, 160.2, 117–34. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.03.02>

Brettin, Michael: Mit Nano gegen den Krebs (2000) *Berliner-Kurier.de*. <https://www.berliner-kurier.de/mit-nano-gegen-den-krebs-17777416>. Zugegriffen: 29. Januar 2018

Budach, Volker: Charité Establishes NanoTherm® Therapy for the Treatment of Recurrent Brain Tumors (2011) *Charité – Universitätsmedizin Berlin*. https://www.charite.de/en/service/press_reports/artikel/detail/charite_etabliert_nano-thermR_therapie_bei_rueckfaellen_von_gehirntumoren/. Zugegriffen: 28. Januar 2018

De Jon, Wim H., Borm, Paul J.A.: Drug Delivery and Nanoparticles. Applications and Hazards (2008) *International Journal of Nanomedicine*, 3.2, 133–49

Dumé, Belle: Liposome-like Nanovesicles Target Tumours (2018) *Nanotechweb.org*. <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/70809>. Zugegriffen: 30. Januar 2018

National Cancer Institute: Earlier Detection and Diagnosis (2017) <https://www.cancer.gov/sites/ocnr/cancer-nanotechnology/detection-diagnosis>. Zugegriffen: 29. Januar 2018

Kaufmann, Stefan H.E.: Paul Ehrlich. Founder of Chemotherapy (2008) *Nature Reviews Drug Discovery*, 7, 37

Krukemeyer, Manfred Georg, Krenn, Veit, Huebner, F, Wagner, Wolfgang et al.: History and Possible Uses of Nanomedicine Based on Nanoparticles and Nanotechnological Progress (2015) *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 6.6. <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000336>

Lehr, Claus-Michael: Biopharmazie und Pharmazeutische Technologie (2016) *Universität des Saarlandes*. <https://www.uni-saarland.de/lehrstuhl/lehr-lab.html>. Zugegriffen: 29. Januar 2018

Maier-Hauff, Klaus, Ulrich, Frank, Nestler, Dirk, Niehoff, Hendrik, Wust, Peter, Thiesen, Burghard et al.: Efficacy and Safety of Intratumoral Thermotherapy Using Magnetic Iron-Oxide Nanoparticles Combined with External Beam

Radiotherapy on Patients with Recurrent Glioblastoma Multiforme (2011) *Journal of Neuro-Oncology*, 103.2, 317–24. <https://doi.org/10.1007/s11060-010-0389-0>

Michigan Technological University: Test Strips for Cancer Detection Get Upgraded with Nanoparticle Bling (2017) *ScienceDaily*. <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/09/170913193131.htm>. Zugegriffen: 29. Januar 2018

Nanoparticles Drug Delivery – PubMed – NCBI. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>. Zugegriffen: 29. Januar 2018

NanoTherm®. *MagForce AG*. <http://www.magforce.de/en/produkte/nanotherm.html>. Zugegriffen: 28. Januar 2018

Paddock, Catharine: Nanotechnology In Medicine: Huge Potential, But What Are The Risks? (2012) *Medical News Today*. <https://www.medicalnewstoday.com/articles/244972.php>. Zugegriffen: 28. Januar 2018

Puiu, Tibi: Nanorobots Made out of DNA Seek and Kill Cancer Cells (2017) *ZME Science*. <https://www.zmescience.com/medicine/nanobots-dna-origami-seek-kill-cancer-cells-32143/>. Zugegriffen: 30. Januar 2018

Reuning, Arndt: Magnetische Partikelchen – Nanomedizin zwischen Wissenschaft und Fiktion (2016) *Deutschlandfunk Kultur*. http://www.deutschlandfunkkultur.de/magnetische-partikelchen-nanomedizin-zwischen-wissenschaft.976.de.html?dram:article_id=365192. Zugegriffen: 29. Januar 2018

Singh, Rajesh, Lillard, James W.: Nanoparticle-Based Targeted Drug Delivery (2009) *Experimental and Molecular Pathology*, 86.3, 215–23. <https://doi.org/10.1016/j.yexmp.2008.12.004>

Sky, Zoe: As Scientists Inch Closer to Fighting Cancer with Nanobots, Would You Embrace Having Programmable Robots in Your Bloodstream? (2018) *Cancer Solutions News*. <http://www.cancersolutions.news/2018-01-06-scientists-fighting-cancer-nanobots-bloodstream.html>. Zugegriffen: 30. Januar 2018

Syn, Nicholas L., Wang, Lingzhi, Chow, Edward Kai-Hua, Lim, Chwee Teck, Goh, Boon-Cher: Exosomes in Cancer Nanomedicine and Immunotherapy. Prospects and Challenges (2017) *Trends in Biotechnology*, 35.7, 665–76. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.03.004>

Wolfram, Joy: The Future of Nanomedicine – Dr Joy Wolfram at the HT Summit 2017. (2017) *NanoApps Medical*. <http://www.nanoappsmedical.com/the-future-of-nanomedicine-dr-joy-wolfram-at-the-ht-summit-2017/>. Zugegriffen: 28. Januar 2018



11

Precision Medicine und das Versprechen von Omics

Einen wahren Hype hat das Thema *Precision Medicine* ausgelöst. Insbesondere bei der Krebsbehandlung erhofft man sich regelrechte Quantensprünge. Die hohen Erwartungen werden selbst von Forschern, die sich ansonsten eher zurückhaltend äußern, geschürt. Der US-amerikanische Forscher Todd Golub, Leiter des Krebsprogramms am Broad Institute, sieht in der Precision Medicine sogar einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur vollständigen Heilung von Patienten mithilfe der Molekularmedizin¹. Ein wenig irreführend ist die deutsche Übersetzung des Begriffs Precision Medicine als „Präzisionsmedizin“, denn

¹Broad Institute. <https://www.broadinstitute.org/home>. Zugegriffen: 25. Februar 2018.

gerade Operationsroboter bieten eine vom Menschen nicht erreichbare Präzision. Doch der Ansatz von Precision Medicine ist ein anderer.

Die sogenannte Präzisionsmedizin ist eine neuere Form der Krankheitsbetrachtung. Dabei stehen individuelle Gesichtspunkte bezüglich der Vorbeugung und der Behandlung von Krankheiten im Mittelpunkt. Konkret sollen dazu alle verfügbaren Informationen, z. B. Umwelteinflüsse, Lebensstil, Stoffwechselzustand etc., erhoben und mithilfe moderner IT-Technologie konsolidiert werden. Außerdem sollen statistische Auswertungen mit Vergleichsfällen erfolgen. Auf dieser umfangreichen Datenbasis sollen therapeutische Entscheidungen und Prognosen eine höhere Aussagekraft besitzen als das bisher möglich war (Collins et al. 2016). Die offizielle Definition von Precision Medicine lautet auf Englisch wie folgt: „An emerging approach for disease treatment and prevention that takes into account individual variability in genes, environment, and lifestyle for each person.“² D. h. ein Ansatz zur Prävention und Behandlung von Krankheiten, basierend auf individuellen genetischen Daten, der Umgebung und der Lebensgewohnheit einer bestimmten Person. Zu unterscheiden ist dieser Begriff von Personalized Medicine, der ebenfalls medial weit verbreitet ist. Personalized Medicine überlappt stark in seiner Bedeutung mit Precision Medicine, wird heute aber weniger gebraucht, weil der Ausdruck den Anschein erweckt,

²U.S. Department of Health and Human Services: What Is Precision Medicine? (2018) *Genetics Home Reference*. <https://ghr.nlm.nih.gov/primer/precisionmedicine/definition>. Zugegriffen: 26. Februar 2018.

dass für jeden Patienten eine jeweils personalisierte, d. h. individualisierte, Behandlungsmethode entwickelt wird. Das wird tatsächlich in den kommenden Jahren viel weiterverbreitet sein, doch liegt der Fokus heute, und das meinen wir mit Precision Medicine, auf dem Verstehen, welcher „bestehende“ Ansatz zu einem Individuum am besten passt.

Doch der Reihe nach.

11.1 Rückblick

Als David Hungerford im Alter von 32 Jahren als erster Forscher die Leukozyten (auch weiße Blutkörperchen genannt) von Leukämiekranken untersuchte, zeigten sich die Krankheitszeichen und ihre zerstörerischen Funktionen. In einem gesunden Körper sind die Leukozyten mit die ersten, die bei einer Infektion oder einer Erkrankung aktiv werden. Hungerford untersuchte das Blut von Patienten mit dem Krankheitsbild chronische myeloische Leukämie, kurz CML, eine bösartige Erkrankung des Knochenmarks. Er stellte dabei fest, dass die Leukozyten teilweise außer Kontrolle geraten waren. Wir schreiben das Jahr 1959, in dem die Ursachenforschung für CML ihren Anfang nahm. Die Ursachen für CML und andere Krebsarten waren damals ein Mysterium.

Parallel arbeitete Peter Novell, ein Pathologe an der Universität von Pennsylvania, an gleichem Zellmaterial. Er züchtete Replikate und beobachtete ihr Wachstum und ihre Proliferation. Hungerford und Novell wussten damals beide nicht so recht, wonach sie eigentlich Ausschau

halten sollten. Hungerford fokussierte sich schließlich auf die 23 Chromosomenpaare, die unsere gesamte DNA tragen. 1959 wusste man lediglich, wie viele Chromosomen existieren; die DNS-Struktur wurde allerdings erst sechs Jahre später entschlüsselt. Hungerford fand heraus, dass bei den Zellen von Leukämiekranken die Hälfte des Chromosom 22 fehlt. Damit war Hungerford der erste Wissenschaftler, der einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Krebserkrankungen und Gendefekten erkannte (Nowell 2007). Heute werden die Erkenntnisse Hungerfords als erster wichtiger Triumph der Precision Medicine gefeiert.

Das verkürzte Chromosom 22 wird auch als Philadelphia-Chromosom bezeichnet. Es entsteht durch eine Chromosomentranslokation zwischen den Chromosomen 9 und 22. Der legendäre Onkologe Richard T. Silver schrieb Anfang der 1990er-Jahre: „Der Ursprung von CML ist ein Rätsel und die Behandlung frustrierend.“ (Silver 1992). Noch Anfang des Jahrtausends lag die durchschnittliche Lebenserwartung nach einer Leukämiediagnose bei fünf Jahren.

Heute konzentriert sich die Behandlung auf die Messung bzw. Überwachung der BCR-ABL-Werte. BCR (Breakpoint Cluster Region) und ABL (Abelson Tyrosine Kinase) sind zwei Gene. Bei der CML bilden sie zusammen ein neues Gen, das sogenannte BCR-ABL-Gen. In diesem neu erzeugten Gen ist quasi die Bauanleitung für die Leukämiezelle enthalten, nach der diese das Eiweiß mit gleichem Namen (BCR-ABL-Eiweiß) herstellt. Das BCR-ABL-Eiweiß gilt heute als wichtigster Angriffspunkt der CML-Therapie. Dazu verwendet man Tyrosinkinasehemmer

(Tyrosine Kinase Inhibitor, TKI). Durch die kontinuierliche Beobachtung des BCR-ABL-Wertes kann man beobachten, wie sich die Erkrankung entwickelt bzw. wie die Behandlung ansetzt. Unter Experten wird die CML-Behandlung als einer der bislang größten Erfolge von Precision Medicine gefeiert, auch wenn die Entstehung von Leukämie weiterhin im Dunkeln liegt. Das Medikament Imatinib (Gleevec[®]) gegen CML wurde 2001 in den USA erstmals zugelassen. Es war ein Meilenstein in der Precision Medicine. Patienten hatten nun plötzlich eine Chance, zu überleben. Hungerford, der selbst an Krebs (allerdings nicht an Leukämie) erkrankte und 1993 verstarb, konnte diese Entwicklungen nicht mehr verfolgen (Altman 1993).

11.2 Precision Medicine heute

Inwiefern kann der Patient von neuen Technologien und Behandlungsmethoden wie der Precision Medicine profitieren? Dabei lohnt ein Blick auf die typischen Abläufe von der Diagnose bis hin zur Behandlung – am besten aus Sicht des Patienten – bei zwei typischen Krebs-erkrankungen: Brustkrebs und metastasiertem Melanom. Brustkrebs ist die häufigste Krebserkrankung bei Frauen und steht bei den krebsbedingten Todesursachen an erster Stelle, noch vor Darm- und Lungenkrebs. Bei Frauen im Alter zwischen 35 und 55 Jahren ist Brustkrebs sogar die häufigste Todesursache überhaupt – zumindest in Deutschland. Die Statistiken anderer Industrienationen zeigen ähnliche Ergebnisse.

Beispiel Brustkrebs

Bei Frauen mit einem positiven Mammografiebefund werden im nächsten Schritt üblicherweise Magnetresonanztomografietests (MRI) durchgeführt. Sollten diese Ergebnisse ebenfalls positiv sein, geht es als Nächstes darum zu eruieren, ob es sich um einen gutartigen oder einen bösartigen Tumor handelt. Mittels einer Biopsie, bei der Gewebe aus dem verdächtigen Bereich entnommen wird, können anschließend Labordiagnosen durchgeführt werden, die den Befund be- oder entkräften. Bestätigt sich der Verdacht, dass es sich um bösartigen Krebs handelt, führt der Pathologe drei weitere Untersuchungen durch, mit denen er die erhöhten Aktivitäten von Hormon- und Östrogen-Rezeptoren prüft. Der dritte Test ist der HER2/neu-Test. HER2 ist ein Rezeptor, also ein Eiweiß bzw. Proteinbaustein auf der Oberfläche von Zellen. Brustkrebspatientinnen weisen häufig eine vermehrte Bildung des Proteins auf. Ergänzend werden die Größe und gegebenenfalls die Streuung ermittelt. Aus diesen verschiedenen Ergebnissen bestimmt der Onkologe den Schweregrad der Erkrankung. Üblicherweise wird die Schwere in vier Grade unterteilt. Aus der Schwere ergeben sich unmittelbar die Behandlungsvarianten chirurgischer Eingriff, medikamentöse Behandlung und Bestrahlung, die auch miteinander kombiniert werden können. Brustkrebspatientinnen profitieren dabei von dem hohen Kenntnisstand, den die Medizin inzwischen erlangt hat. Daraus ergeben sich eine Fülle von Behandlungsoptionen. Unglücklicherweise reduzieren sich die Behandlungsmöglichkeiten, je später eine Diagnose erfolgt. Aber grundsätzlich ist Precision Medicine heute Goldstandard in der Behandlung von Brustkrebs.

Beispiel Hautkrebs

Ein Krebstyp gilt als besonders heimtückisch, weil er kaum im Frühstadium erkannt wird: der Hautkrebs. Zwar erkranken weit weniger Menschen an diesem Krebstyp als an den beiden häufigsten Erkrankungen Brust- und Prostatakrebs, aber dafür sind die Folgen weit dramatischer. Bei einer fernmetastasierten Erkrankung liege die Mortalität in Deutschland bei 60 % innerhalb der ersten zwölf Monate nach Diagnose, d. h. sechs von zehn Patienten sterben innerhalb eines Jahres.

Wird ein malignes Melanom in einem frühen Stadium erkannt, ist es recht einfach, es durch einen chirurgischen Eingriff zu entfernen. Haben sich bereits Metastasen gebildet, kommt man nicht um eine medikamentöse Behandlung herum. Das Jahr 2011 gilt als Wendepunkt in der Behandlung dieser heimtückischen Krebsform. Bis dahin waren lediglich zwei Medikamente für die Behandlung zugelassen: Dacarbazin und hochdosiertes Interleukin-2. Den Wendepunkt stellte die Enträtselung der BRAF-Metastasierung dar. Das menschliche Gen BRAF produziert ein Protein, welches als wichtiger Bestandteil des RAS-RAF-Signalweges am normalen Wachstum und Überleben von Zellen beteiligt ist. Durch mutierte Formen werden die Signalwege überaktiv, was zu unkontrolliertem Zellwachstum und Krebs führen kann. Neuere Forschungen gehen davon aus, dass sich solche Mutationen schätzungsweise bei etwa 60 % aller Melanome finden.

Zur Therapie verabreicht man BRAF-Inhibitoren, wie etwa Vemurafenib. Damit ließen sich bemerkenswerte Ansprechraten bei Patienten mit metastasierendem

Melanom mit der BRAF-Mutation V600E erzielen. Zwar sehen Forscher noch nicht, dass damit ein endgültiger Durchbruch geschaffen wurde, aber die ersten klinischen Ergebnisse werden von Experten als sehr ermutigend betrachtet. Seit 2016 existieren weitere Medikamente, denen eine Wirkung attestiert wird, beispielsweise Ipilimumab, Dabrafenib, Pembrolizumab, Nivolumab und Cobimetinib. Diese Wirkstoffe können je nach Krankheitsbild und -verlauf einzeln oder auch in Kombination verabreicht werden. Bzgl. der Behandlung von Hautkrebs-erkrankungen konnte man innerhalb von nur fünf Jahren signifikante Fortschritte erzielen. Wie kam es dazu? Um es vorwegzunehmen: Wir verdanken es der Precision Medicine. Precision Medicine fokussiert nicht mehr nur die Symptome einer Krankheit, sondern versucht auch, den Patienten als Ganzes zu verstehen – angefangen bei der Erkennung über die Behandlung bis zur Nachsorge.

11.3 Technologie als Treiber von Precision Medicine

Precision Medicine lebt in hohem Maße von der Annahme, dass sich durch das Sammeln, Konsolidieren und Analysieren von gigantischen medizinischen Daten optimale Behandlungsmuster ermitteln lassen – das ist zumindest die Hoffnung all derer, die an entsprechenden Lösungen arbeiten. Die medizinischen Datenberge bewegen sich längst im Exabyte-Bereich. Forscher gehen heute davon aus, dass bis 2020 mehr als

2300 EB Gesundheitsdaten jährlich gesammelt werden³. Zum Großteil getrieben durch die Präzisionsmedizin. Ein Exabyte entspricht einer Trillion Bytes oder anders ausgedrückt einer Milliarde Gigabyte. Weil sich unter diesem Wert eigentlich niemand so richtig etwas vorstellen kann, helfen einige Vergleiche weiter: Ein Exabyte entspricht 212 Mio. DVDs mit einem Gesamtgewicht von 3404 t. Die Größe des Internets wird im Oktober 2017 auf 11.635.700 PB beziffert. Das entspricht 11.635,7 EB.

Auch wenn es schwerfällt, sich diese Datenmengen vorzustellen, bedarf es keiner großen Fantasie, dass alleine die Speicherung eine Herkulesaufgabe darstellt. Ganz zu schweigen von der Analyse, dem Ab- und Vergleich und der gezielten Informationssuche. In spezifischen Speicherlösungen werden strukturierte und unstrukturierte Datensätze mit verschiedenen Algorithmen verarbeitet:

- Chemoinformatische Algorithmen stellen Korrelationen zwischen der molekularen Struktur und den Funktionen auf der chemischen Ebene her.
- Genomisch-transkriptomische Algorithmen identifizieren Abnormitäten wie Mutationen, die mit heterogenen Krankheiten wie Krebs oder Erbkrankheiten wie Mukoviszidose übereinstimmen.

³Cherry, Gabe: Hacking Health Care (2017) *University of Michigan Precision Health*. <http://precisionhealth.umich.edu/feature-stories/hacking-health-care/>. Zugriffen: 26. Februar 2018.

- Integrative Algorithmen, die häufig auf künstlicher Intelligenz basieren, ergänzen den genomischen Gesichtspunkt um biologische und klinische Informationen (KI), um eine breite Grundlage für Vorhersagen zu schaffen.

Die Bio- und die Chemoinformatik sowie die integrative Informatik nutzen primär KI-Technologien, um bislang verborgene Informationen zu identifizieren. Auch die Computersicherheit macht sich diese Technik zunutze, um beispielsweise bislang unbekannte Angriffsmuster zu erkennen. In Kombinationen mit Machine Learning und hier speziell Deep Learning eröffnen sich bislang ungeahnte Möglichkeiten. Eine weitere IT-Technologie bringt die Precision Medicine voran: das Cloud Computing. Beides in Kombination führt bei der Auswertung von medizinischen Daten zu deutlichen Kostensenkungen und reduziert gleichzeitig die Hürden für einen Markteintritt. Forscher profitieren außerdem von dem rasanten Entwicklungstempo, das die IT-Technologie vorlegt. Dank des Vorhandenseins von Open Source-Applikationen, wie High-end-Datenbank- und Analysesystemen, stehen den Forschern Werkzeuge mit beträchtlichen Möglichkeiten zur Verfügung (Netto and Schrijver 2015).

Der Ursprung von Precision Medicine

Doch neben den Cloud Computing und Speicherlösungen hat vor allem eine Technologie die Precision Medicine

vorangetrieben: die Sequenzierung unserer Gene. Eine Geschichte, die im 19. Jahrhundert ihren Anfang nahm⁴:

- 1871 entdeckt Friedrich Miescher die Grundsubstanz unserer DNA, das Nuklein.
- 1953 publizieren James Watson und Francis Crick die DNS-Doppelhelixstruktur.
- 1977 entwickelt Frederick Sanger eine DNS-Sequencing-Technologie und sequenziert das erste volle Genom, jenes eines Virus' namens phiX174.
- 1990 wird das Human Genome Projekt lanciert. In dessen Rahmen soll innerhalb von 15 Jahren das gesamte menschliche Genom sequenziert werden.
- 14. April 2003 – das Human Genome Projekt wird erfolgreich abgeschlossen. Es bestätigt, dass der Mensch 20.000–25.000 Gene hat.

Es dauerte also 132 Jahre vom Entdecken der DNA bis zum vollständigen Sequenzieren derselben. Die Kosten hierfür waren anfänglich astronomisch hoch und ein wesentliches Hindernis. Das erste an Konsumenten gerichtete Angebot stammte vom Unternehmen Knome. Es bot 2007 an, das gesamte Genom für 350.000 US\$ zu sequenzieren, inklusive der Interpretation. 2010 führte Illumina einen ähnlichen Service für Konsumenten ein, zum Preis von 50.000 US\$. September 2015, Veritas Genetics bietet die Sequenzierung und Interpretation für

⁴Yourgenome: Timeline. History of Genomics (2016) <https://www.yourgenome.org/facts/timeline-history-of-genomics>. Zugegriffen: 26. Februar 2018.

1000 US\$ an. Damit wurde Craig Venters Ankündigung aus dem Jahre 2002, „The Future of Sequencing: Advancing Towards the US\$ 1,000 Genome“⁵, Realität.

Heute befinden wir uns im sogenannten NGS-Zeitalter (Next Generation Sequencing). Hier erfolgt eine Hochdurchsatzsequenzierung von Genmaterial. Die Technik beruht im Wesentlichen auf der parallelen Sequenzierung von Millionen DNS-Fragmenten in einem einzigen Sequenzierlauf. Diese Technik wird insbesondere für die Identifizierung neuer Krankheitsgene eingesetzt, hat aber auch den Bereich der Humangenetik revolutioniert: Im diagnostischen Bereich können heute nahezu alle monogenen Krankheitsbilder, insbesondere auch solche mit ausgeprägter genetischer Heterogenität, analysiert werden. Der Einsatz der Informatik und der IT-Technologie in der Biowissenschaftsindustrie steckt noch in den Kinderschuhen, aber schon heute ist erkennbar, wohin die Reise gehen wird. Die zunehmenden Konvergenzen von Daten- und Computerwissenschaften, Chemie, Molekularbiologie und Genetik werden uns noch viel Neuerungen bringen.

Next Generation Sequencing in der Anwendung

Eines der führenden Unternehmen spezialisiert auf das Sequenzieren von Tumorgewebe ist Foundation Medicine aus den USA. Das Unternehmen untersucht das Zellmaterial von Patienten, welche an Krebs erkrankt sind auf Mutationen im Erbgut. Basierend auf den Ergebnissen

⁵Wikipedia: US\$ 1,000 Genome. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=US%24_1,000_genome&oldid=808006657. Zugriffen: 26. Februar 2018.

werden dann klinische Studien oder Medikamente empfohlen. So kann häufig eine sehr präzise Behandlung erfolgen. Diese *genomische Analyse* wird in den USA langsam zur Routine, ist in Europa und in anderen Regionen aber noch nicht die Regel. Zwei Faktoren stehen im Wege: Zum einen ist der Test teuer und die Kassen übernehmen die Kosten in den meisten Ländern nicht. Zum anderen deuten die Resultate häufig auf Medikamente hin, welche für diese spezifische Anwendung nicht zugelassen sind, und somit meist auch von der Kasse nicht vergütet werden. Doch trotz dieser Bedenken erwarte ich, dass NGS im Onkologiebereich innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre weltweit eine Routineuntersuchung wird. Die Möglichkeiten, welche sich durch die Ergebnisse öffnen, sind unglaublich spannend. So wurde in Vergangenheit meist ein Therapie gemäß Tumortyp verwendet, und diese war häufig nicht spezifisch, wie z. B. die traditionelle Chemotherapie Cisplatin. Diese wirkt auf alle Gewebe und verursacht dadurch vor allem in sich schnell teilenden Geweben (Darm, Haarzellen) Schäden.

Seit einigen Jahren haben wir für einzelne Tumortypen sehr gezielte Therapien. Diese benötigen sogenannte Biomarker. Ein Beispiel ist Herceptin® für die Behandlung von Brustkrebs welches HER-2 positiv ist. In Zukunft werden die Therapien aber weniger durch die Krebsart selbst bestimmt, sondern viel mehr durch die zugrunde liegenden Mutationen. So hat die amerikanische Zulassungsbehörde 2017 erstmals ein Medikament zugelassen, nicht für eine bestimmte Krebsart, sondern für bestimmte Biomarker in Zusammenhang mit der genomischen Analyse. So ist das Medikament Keytruda®

(Pembrolizumab) zugelassen für alle soliden metastasierenden Tumore mit entweder hoher Mikrosatelliteninstabilität (MSI-H) oder Mismatchreparaturdefizienz (dMMR). Wir werden in den nächsten Jahren mehr und mehr dieser sehr zielgerichteten Krebstherapien sehen. Dabei werden wir aber mit einer wesentlichen Herausforderung konfrontiert. Patienten mit Krebs haben häufig mehrere Mutationen⁶. Doch um die Sicherheit von allen möglichen Therapiekombinationen zu zeigen, müssten wir tausende klinische Studien machen. Dafür haben wir keine Zeit. Wir werden deshalb umdenken müssen, wie wir im Zeitalter der Präzisionsonkologie neue Therapien in Kombination anwenden. Ein wesentlicher Schlüssel hierzu wird ein globaler Datenaustausch sein. Von jedem Patienten können wir lernen. Und wir sollten diese Daten global auswerten, sodass Onkologen Zugriff haben auf einen immer größer werdenden Patientenstamm, mit Hilfe dessen sie für eine jeweilige Mutation prüfen können, wie der Patient reagiert hat. Doch leider sind wir hiervon noch weit entfernt. Kliniken wollen ihre Daten häufig nicht teilen. Einzelne sehen darin sogar eine Möglichkeit Geld zu verdienen, indem sie Patientendaten verkaufen. Außerdem sind die Datensysteme zwischen den Kliniken nicht kompatibel oder gar nicht digital. Die USA sind hier schon deutlich weiter. In Europa stehen uns wie üblich die Landesgrenzen im Wege.

⁶U.S. Food and Drug Administration: FDA Approves First Cancer Treatment for Any Solid Tumor with a Specific Genetic Feature (2017). <https://www.fda.gov/newsevents/newsroom/pressannouncements/ucm560167.htm>. Zugegriffen: 27. Februar 2018.

Ohne Zweifel wird die Möglichkeit große Datenmengen mit fortgeschrittenen Algorithmen zu analysieren, ebenfalls eine bahnbrechende Rolle spielen im Verständnis unseres Genmaterials und in der Empfehlung einer Therapie. So gibt es bereits heute die ersten Unternehmen die beides zusammenbringen. Der Groupon-Mitbegründer Eric Lefkofsky hat in den USA das Unternehmen Tempus ins Leben gerufen⁷. Es ist spezialisiert auf die genomische Analyse von Krebsgewebe und die anschließende Auswertung von großen Mengen an unstrukturierten Gesundheitsdaten des Patienten. Das beinhaltet die Krankengeschichte, Laboruntersuchungen, radiologische oder pathologische Befunde. Das Resultat sind gut strukturierte, umfassende Patientendaten gepaart mit den genomischen Resultaten, welche dem behandelnden Onkologen dann eine optimale Grundlage für die Therapiefestlegung geben.

NGS ist aber nicht immer möglich, da es häufig an genügend Tumormaterial mangelt. So haben sich in den letzten Jahren weitere spannende Technologien durchgesetzt, die in Zukunft ebenfalls eine zentrale Rolle in der genomischen Analyse spielen könnten. Die Analyse von im Blut zirkulierender Tumor-DNA (ctDNA) ist eine dieser aufstrebenden Technologien.

Zirkulierende Tumor-DNA kann mittels Liquid Biopsy, d. h. aus dem Blut und somit nicht invasiv, gewonnen werden. Das ist besonders hilfreich, wenn solides Tumormaterial nicht gewonnen werden kann und um über die

⁷Tempus. <https://www.tempus.com/index.html>. Zugegriffen: 27. Februar 2018.

Zeit den Tumorverlauf zu monitoren. So kann im Blut schnell gesehen werden, ob der Tumor auf die Therapie anspricht oder ob er wächst und metastasiert. Leider ist dieser Ansatz noch nicht reif genug, um nach noch nicht bekannten Tumoren zu suchen (Bettegowda et al. 2014).

Der nächste Horizont von Precision Medicine

Bisher steht die Analyse des genetischen Materials im Vordergrund. In Zukunft werden die genomischen Informationen aus dem Sequenzieren aber nach und nach mit weiteren Omics-Quellen ergänzt und somit wird die Präzision unserer Therapie weiter erhöht. Die verschiedenen Quellen, welche hier zum Zuge kommen sind (Hasin et al. 2017):

- Epigenom
- Transkriptom
- Proteom
- Metabolom
- Mikrobiom

Das *Epigenom* untersucht die chemischen Substanzen und Proteine, welche ein Gen *modulieren*, das heißt dessen Aktivität steuern. Das Epigenom als solches ist die Gesamtheit von chemischen Modifikationen der DNA (z. B. Methylierung) oder von DNS-assoziierten Molekülen, welche die Expression von Genen verändern⁸.

⁸National Human Genome Research Institute (NHGRI): Fact Sheet. Epigenomics (2016). <https://www.genome.gov/27532724/epigenomics-fact-sheet>. Zugegriffen: 27. Februar 2018.

Das Epigenom ist vererbt, kann sich aber durch unsere Umwelteinflüsse verändern. So können diese Veränderungen dazu führen, dass ein Gen nicht mehr oder zu stark exprimiert wird und so zu unkontrolliertem Zellwachstum führt, dem Krebs. Ein besseres Verständnis von diesem Vorgang wird helfen nachzuvollziehen, welche Faktoren letztlich zu Krebs führen können. Im Unterschied zur Epigenomik befasst sich die Genomik mit den Veränderungen der DNA selbst, d. h. der Basenpaare, welche die genetische Information darstellen.

Die DNA ist unsere Bauanleitung. Kopien davon werden abgeschrieben, *transkribiert*, und liegen dann als RNA vor. Die Summe dieser Abschriften ist das *Transkriptom*⁹. Die RNA kann dann als mRNA die Bauanleitung für Proteine sein oder als RNA direkt Abläufe innerhalb der Zelle beeinflussen. Die Untersuchung der RNA gibt Aufschluss darüber, welche Gene „abgeschrieben“ werden und wie sich die RNA von Zelle zu Zelle unterscheidet. So sehen wir, welche Gene die Eigenheit einer Zelle beeinflussen oder zur Entstehung von Krebs beitragen.

Das *Proteom* ist die Gesamtheit der Proteine, welche im Körper gemäß der DNS-Bauanleitung abgeschrieben werden, inklusive aller Veränderungen dieser Proteine nach der Herstellung (posttranslational modifications). Vereinfacht können wir sagen, dass wenn die DNA die Bauanleitung ist, die Proteine die Bausteine sind. Und wenn diese Bausteine verändert werden, führt dies zu

⁹National Human Genome Research Institute (NHGRI): Fact Sheet. Transcriptome (2015). <https://www.genome.gov/13014330/transcriptome-fact-sheet>. Zugriffen: 27. Februar 2018.

Krankheiten. Der erste menschliche Proteom-Atlas wurde im Jahre 2015 publiziert. Somit kann heute das Proteom eines Patienten mit dem „durchschnittlichen“ Genom verglichen werden und nach Auffälligkeiten gesucht werden. In Zukunft werden wir aber das Proteom eines Einzelnen über die Zeit beobachten können. Wenn wir erkranken, können wir Proteine, welche sich verändert haben, als mögliche Auslöser identifizieren. Dafür sind die Kosten heute noch zu hoch und der Ansatz ist noch keine Routine in der Klinik. Doch ohne Frage wird das Proteom unser medizinisches Verständnis fundamental erweitern. Dies wird das Zeitalter der *personalisierten Proteomik*.

Das *Metabolom* ist die Summe der Metaboliten innerhalb unseres Organismus. Aktuelle Schätzungen gehen von ca. 19.000 Metaboliten aus (Clish 2015). Im Gegensatz zur Proteomik oder Genomik bestehen die Metaboliten aus zahlreichen unterschiedlichen Typen von Substanzen. Daraus resultiert die Schwierigkeit, dass es kein einheitliches System zur Messung derselben gibt. Wie schnell unser Verständnis hier wachsen wird und die klinische Routine erreicht, ist nicht vorhersehbar. Wir sehen aber bereits erste Unternehmen, wie z. B. Metabolom, die sich der Aufgabe verschrieben haben¹⁰. Mit jungen Unternehmen kommt Kapital und Innovation und damit eine massive Beschleunigung der Fortschritte.

Das *Mikrobiom* wird immer mehr als kritischer Baustein für unsere Gesundheit verstanden. Der menschliche

¹⁰Metabolon (2017). <http://www.metabolon.com/>. Zugegriffen: 27. Februar 2018.

Körper beherbergt eine Vielzahl von Mikroben. Sie sind überall und übernehmen häufig enorm wichtige Prozesse, beispielsweise im Darm. Was zunächst ekelig anmutet, ist für den Menschen überlebenswichtig. Heute ist die Forschung zum Mikrobiom angesagter denn je. Alleine 2016 sollen mehr als 7000 Studien zu den Winzlingen verfasst worden sein. Man hat ihre Rolle bis heute nicht vollständig verstanden. Die Medizin weiß noch nicht genug, welche Zusammensetzung uns gesund hält und welche uns krankmacht. Bei der Beantwortung der Frage, wie eine gesunde Besiedlung des menschlichen Körpers mit Bakterien, Viren und Pilzen aussieht, soll nun auch Precision Medicine weiterhelfen.

Die Liste der Krankheiten, die durch eine gestörte Balance der Mikroben bedingt ist, ist lang. Laut dem National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases leidet ein Fünftel aller Amerikaner an Verdauungskrankheiten (NIDDK 2014). Die Forschungen jüngerer Zeit zeigen eindeutige Korrelationen zwischen dem mikrobionischen Ungleichgewicht und dem Entstehen von Krankheiten. Auch Krankheiten am Verdauungstrakt werden in diesen Kontext gebracht. Das Kernproblem vieler Studien: Sie wurden an Mäusen durchgeführt und basieren nicht auf menschlichen Daten. Die Forschungsschwerpunkte liegen in der Ermittlung des Host-Schutzes und der Rolle des Immunsystems.

Neuere Forschungen weisen darauf hin, dass es eine Verbindung zwischen der Zusammensetzung der Darmflora und Erkrankungen des Gehirns gibt. In Fachkreisen spricht man in diesem Kontext von der *Darm-Hirn-Achse*. Es konnten sogar Wechselwirkungen zwischen

der menschlichen Darmflora und neurologischen Erkrankungen, wie Multiple Sklerose, Parkinson oder Alzheimer, hergestellt werden. Die klinischen Konsequenzen dieser Achse sind bislang unbekannt. Hier – wie auch in anderen Bereichen – erhoffen sich Forscher Unterstützung durch die Precision Medicine.

Das starke Interesse an den mikrobiomischen Vorgängen hat einen einfachen Grund: Man erhofft sich durch ein besseres Verständnis der Vorgänge und der Rolle der Mikrobiome für die menschliche Gesundheit die Entwicklung von Therapien, die ein besseres Ergebnis erzielen als bisherige Ansätze. Das Erlangen von Diagnosemöglichkeiten zur Ermittlung von mikrobionischen Ungleichgewichten und deren Behandlung gilt als ultimatives Ziel der Precision Medicine. Dazu existieren verschiedene Ansätze. Der scheinbar simpelste Weg: Man verpflanzt mikrobiotische Kolonien so, dass das Gleichgewicht wiederhergestellt wird. Dazu züchtet man *in vitro* die Mikroorganismen und platziert sie an den benötigten Stellen. Inzwischen gibt es verschiedene Unternehmen, die derlei Lösungen entwickelt haben.

Einen anderen Ansatz verfolgt die sogenannte *Next-Generation-Probiotik*. Füllt man die Lücke oder beschädigte Bereiche wieder mit einer entsprechenden Bakterienflora auf, wird im Falle des Darms nicht nur ein gesundes Verdauungsklima wiederhergestellt, sondern man erschwert es damit auch pathogenen Zuwanderern, sich dort niederzulassen. Die Next-Generation-Probiotika sollen wesentlich effektiver werden und wecken schon heute Hoffnung als Waffe gegen multiresistente pathogene Keime.

Bis wir all diese Omics-Plattformen verstehen und miteinander in Beziehung setzen können, wird es noch dauern. Doch der Fortschritt in der Analytik sowie die sinkenden Kosten, könnten dies unerwartet beschleunigen. Die oben beschriebenen Kosten für das Sequenzieren von DNA folgten nicht dem Moerschen Gesetz. Ab dem Jahr 2007 sind die Preise rapide gesunken, entgegen der Voraussage (Wetterstrand 2017).

11.4 CRISPR – wir korrigieren unsere Gene

Enormes Potenzial wird einem relativ neuen Verfahren in der Precision Medicine attestiert, das Änderungen an DNS-Bausteinen des Erbguts ermöglicht. Manche sprechen sogar vom Science-Fiction-Potenzial und einer medizintechnischen Revolution. Die Rede ist von CRISPR/Cas9. Dieses Verfahren erlaubt einfache und bislang unerreicht präzise Eingriffe in das Erbgut. Damit eröffnen sich neue Behandlungsmöglichkeiten gegen AIDS, Krebs und eine Reihe von Erbkrankheiten. Man spricht auch von Genome Editing. Wie bei anderen Editierverfahren kommen auch bei CRISPR/Cas9 drei Schritte zum Einsatz:

- *Finden:* Im ersten Schritt wird der CRISPR-Abschnitt ermittelt, in dem eine bestimmte Gensequenz umgeschrieben werden soll.
- *Schneiden:* Das an den CRISPR-Abschnitt gekoppelte Cas9-Protein schneidet den DNS-Doppelstrang exakt

an der gewünschten Zielsequenz durch. Beide Elemente, CRISPR und Cas9, werden synthetisch hergestellt und anschließend in eine Zelle eingeführt.

- *Reparieren:* Die zelleigenen Reparatursysteme fügen den durchtrennten DNS-Strang wieder zusammen. Dabei können einzelne DNS-Bausteine entfernt oder modifiziert werden. Auch der Einbau kurzer DNS-Sequenzen ist möglich.

Der zentrale Vorteil dieser Technik liegt in der Anpassbarkeit und der einfachen Nutzung. Andere Gene-Editing-Technologien, wie TALENS oder ZFN, sind lange nicht so einfach anzuwenden. Auch die vergleichsweise kostengünstige Anwendung spricht für dieses Verfahren.

Ende 2017 wurde der erste Patient in einer klinischen Studie mit dem CRISPR-Verfahren behandelt (Kaiser 2017). Der Patient leidet an einer Erbkrankheit namens Hunter Syndrom, welche eine Störung des Stoffwechsels hervorruft. Ob das Verfahren den 44-jährigen Patienten zu heilen vermag, bleibt noch offen. Andere Studien am Menschen sind für 2018 geplant, meistens für seltene Erbkrankheiten, wie z. B. die Sichelzellanämie. Eine weitere Anwendung könnte die Heilung von HIV sein. HIV-Viren pflanzen ihre eigene DNA in unser Erbgut ein. Mit CRISPR könnten wir diese aus unserem Erbgut entfernen und so HIV bekämpfen. Doch denken viele Forscher, dass der Einsatz der Technologie am Menschen noch Jahre entfernt ist (Mullin 2017).

Mögliche Anwendungen in der Zukunft werfen aber auch Fragen auf, wie weit wir gehen sollten. So ist denkbar, dass CRISPR dazu benutzt werden kann, die

Intelligenz zu steigern¹¹. Oder generell, um jene Charakteristiken zu beeinflussen, welche uns zu überlegenen Menschen machen könnten. Wie weit sind solche Modifikationen sinnvoll? Die Forschung weiß auch noch lange nicht, welche Konsequenzen sich aus verschiedenen Modifikationen ergeben. Aktuell fokussiert sie sich auf die Genmanipulation von Pflanzen. Da die Verhältnisse beim Menschen und die Zusammenhänge weit komplexer sind, ist auch mit nicht unerheblichen Risiken zu rechnen. Die Potenziale zur Behebung von Erbkrankheiten scheinen indes gewaltig. Noch ist vieles von dem, was per Gene Editing beim Menschen möglich ist, Zukunftsmusik. Neben rein technologischen Aspekten müssen eben auch ethische, regulatorische und rechtliche Fragen geklärt werden, um einen Missbrauch zu verhindern. Meine Sicht ist, dass vieles beim Menschen nicht durch einen Eingriff gelöst werden kann. Außer vielleicht bei sehr klar begrenzten Erbveränderungen. Dass wir mit CRISPR plötzlich Superbabys „züchten“ können, ist zumindest in der mittelfristigen Zukunft unwahrscheinlich. Wir sollten deshalb vermeiden, CRISPR Hürden in den Weg zu stellen, und stattdessen den Menschen, die an schwerwiegenden und seltenen Erkrankungen leiden, eine Therapieoption bieten.

¹¹The Medical Futurist: What Could CRISPR Do Tomorrow? (2016). <http://medicalfuturist.com/what-could-crisprcas9-do-tomorrow/>. Zugegriffen: 27. Februar 2018.

11.5 Hilfe vom Immunsystem

Wie oben bereits beschrieben, sehen Experten den primären Anwendungsbereich von Precision Medicine in unmittelbarer Zukunft in der Krebsbehandlung. Für Pharmaunternehmen ist die Krebstherapie ein signifikanter Markt. Alleine 2015 sollen weltweit 80 Mrd. US\$ für Krebsmedikamente ausgegeben worden sein. Aktuell wird der Immunonkologie, einem Zweig der Präzisionsonkologie, das größte Potenzial bei der Krebsbehandlung attestiert. Bei der Behandlung von Alltagskrankheiten, wie Schnupfen und Grippe, setzt man insbesondere auf die Stärkung der patienteneigenen Abwehrkräfte. Doch sind die stark genug, um auch gegen schwere Krankheiten wie Krebs zu bestehen? Die gute Nachricht: Ja, sind sie. Das menschliche Immunsystem ist das Instrument des Körpers zur Bekämpfung von Erregern und geschädigten Zellen. Die Fähigkeiten des körpereigenen Abwehrsystems werden mittlerweile bei einigen Krebserkrankungen genutzt – mit Erfolg. Die sogenannte Krebsimmuntherapie gilt als großer Hoffnungsträger der Medizin. Man konnte beispielsweise bei der Behandlung von schwarzem Hautkrebs und fortgeschrittenem Lungenkrebs Erfolge erzielen, doch noch steht die Wissenschaft vor erheblichen Herausforderungen.

Neu ist die Idee nicht, Krebszellen mithilfe des eigenen Immunsystems zu bekämpfen. Bereits vor mehr als 150 Jahren nutzte der Bonner Chirurg Busch diesen Ansatz zur Behandlung einer krebskranken Frau. Es legt sie in das leere Bett eines Patienten mit Wundrose. Das war 1867. Berichten zufolge schrumpfte der lebensbedrohliche

Tumor im Hals der Frau. Busch hat damals Medizingeschichte geschrieben (Hausen 2015). Doch Experten verstehen erst heute die vielfältigen Interaktionen zwischen Krebszellen und dem Immunsystem, um mithilfe dieses Ansatzes neue Wege in der Krebstherapie zu beschreiten.

Leider ist der Krebs ein „intelligenter“ Gegenspieler und sogar in der Lage, sich vor dem Immunsystem zu verstecken. Damit er angreifbar wird, muss man ihn sozusagen aus der Deckung holen. Das menschliche Immunsystem ist eigentlich ein zuverlässiger Vernichtungsmechanismus für Substanzen, die den Körper schädigen können. Prinzipiell unterscheidet man zwischen zwei Immunreaktionsvarianten: angeborenes und erworbene Immunsystem.

Bei dem angeborenen Immunsystem richtet sich die Abwehrmaßnahme unspezifisch gegen alle Krankheitserreger. Der Körper kann so einen Großteil der Infektionen abwehren. Die erworbene Immunantwort reagiert mithilfe von sogenannten T- und B-Zellen auf bestimmte Strukturen von Erregern und Zellen. Man spricht auch von Antigenen. Die T-Zellen sind auf ihrer Oberfläche mit Antigenrezeptoren ausgestattet, die antigentragende Zellen erkennen und vernichten. Das Besondere an dem erworbene Immunsystem ist sein Gedächtnis: Es merkt sich Antigene und kann bei einem erneuten Kontakt ein Antigen wiedererkennen und entsprechend darauf reagieren.

Damit man diesen Mechanismus für das Bekämpfen von Krebszellen nutzen kann, müssen Krebszellen an ihrer Zelloberfläche Merkmale tragen, damit diese auch für das Immunsystem erkennbar sind. Man spricht auch von

tumorassoziierten Antigenen (TAA). Das Heimtückische: Viele Tumorarten entwickeln Strategien, mit denen sie ihre bösartige Identität verschleieren. Sie präsentieren dem Immunsystem beispielsweise keine Antigene oder lassen diese als körpereigen erscheinen (Sankawa 2014).

Damit Krebs mithilfe des Immunsystems angreifbar wird, bedarf es eines Tricks, um den Krebs aus seiner Deckung zu holen. Die Immunonkologie nutzt hierfür Checkpoints. D. h. gewisse Moleküle müssen aktiviert werden, damit unser Immunsystem Zellen angreift. Diese kann man sich als Kontrollpunkte des Immunsystems vorstellen. Krebszellen können sich allerdings vor diesen Kontrollen tarnen. Also muss ein Ansatz gefunden werden, der die Kontrollfunktion auf schadhafte Zellen wieder aktiviert. Hier setzen sogenannte Checkpoint-Inhibitoren an. Sie lösen die krebsbedingte Blockade auf und stimulieren das Immunsystem, damit dieses die Tumorzellen erkennen und vernichten kann.

Der bekannteste Checkpoint ist PD-1. Ein Rezeptor auf der Oberfläche von T-Zellen. Wenn der PD-1-Rezeptor an ein PD-L1-Protein an der Oberfläche einer anderen Zelle bindet, wird signalisiert: „Ich bin eine normale Zelle – lass mich in Ruhe.“ Medikamente, die eine Aktivierung begünstigen, sind entweder PD-1-Inhibitoren oder PD-L1-Inhibitoren. Beispiele von zugelassenen Medikamenten für den ersten sind Pembrolizumab (Keytruda[®]) und Nivolumab (Opdivo[®]). Zugelassene Medikamente für PD-L1 Atezolizumab (Tecentriq[®]), Avelumab (Bavencio[®]) oder Durvalumab (Imfinzi[®]). Ich nenne diese Details, weil wir alle noch viel von diesen Produkten hören werden. Aktuell laufen unzählige klinische Studien, um die

Wirksamkeit in den verschiedenen Krebsarten zu prüfen. Erfolge konnten bereits beim Melanom, einer Form des Lungenkrebses, Blasenkrebs oder Hodgkin Lymphom verzeichnet werden. Weitere sollten bald folgen.

Ein weiterer wichtiger Checkpoint ist CTLA-4. Wenn dieser Rezeptor aktiviert wird, schaltet er im Wesentlichen die T-Zelle ab. Ipilimumab (Yervoy) ist ein Antikörper der an CTLA-4 bindet, und damit das Immunsystem aktiviert.

Das erste Medikament, das diesen Ansatz nutzt, ist der 2011 zugelassene Checkpoint-Hemmer Ipilimumab, der beim schwarzen Hautkrebs zur Anwendung gelangt. Noch recht jung ist das 2015 zugelassene Nivolumab, das bei fortgeschrittenem Lungenkrebs verabreicht wird. Wie klinische Studien zeigen, konnte es die Lebenserwartung verbessern (Brahmer 2015).

Herausforderungen der Immuntherapie

Es ist wünschenswert, dass man mit der Aktivierung der körpereigenen Immunkräfte selbst schwerste Krebsformen erfolgreich bekämpfen kann. Doch heute weiß man, dass der Erfolg und Misserfolg einer Immuntherapie entscheidend davon abhängt, ob man die Balance zwischen Stimulierung und Hemmung des Immunsystems findet. Andernfalls kann es zu negativen Folgen des überaktiven Immunsystems kommen, wie man sie beispielsweise bei Autoimmunerkrankungen antrifft.

Außerdem kann es wegen der Alterationen der immunologischen Abwehr zu erheblichen Nebenwirkungen kommen: Entzündungen der Hirnanhangsdrüse, der Augen, des Darms oder der Haut können

die Folge sein. Bei manchen Behandlungen sind die Nebenwirkungen so dramatisch, dass die Behandlung abgebrochen werden muss. Forscher wissen bislang außerdem noch wenig über die Ansprechraten. Bei einigen Patienten wirkt die Immuntherapie, bei anderen schlägt sich nicht an. Man geht davon aus, dass die objektive Ansprechraten nur bei 15 % liegt. Hier wird es wichtig sein, die Biomarker zu definieren, welche bei einem Patienten auf eine höhere Ansprechraten hindeuten, wie z. B. das Messen von der Mutationsrate der Tumor-DNA (tumor mutation burden – TMB). Ein weiteres Problem: Die immensen Kosten. Eine Infusion kostet 15.000 EUR, auf das Jahr hochgerechnet belaufen sich die Kosten auf 100.000 EUR pro Jahr. Und weil sich dadurch neue Therapieoptionen öffnen, wird sich bald die Frage stellen, wie wir das finanzieren wollen. Wir sind eine alternde Gesellschaft. Krebs wird immer häufiger. Die Kosten werden zwangsläufig steigen, wenn wir eine bessere Auswahl an Therapien haben.

Aktuell steht die Frage im Fokus der Forschung, wie man das Immunsystem dazu bewegt, langanhaltende Erfolge zu erzielen. Es scheint, als stünde man bei der Behandlung von Nierenkrebs und dem malignen Lymphom vor den Durchbruch. Die Forschungsanstrengungen konzentrieren sich auch darauf, wie man Immuntherapien mit konventionellen Behandlungsmethoden koppelt, um nachhaltige Behandlungserfolge zu erzielen. Bislang weiß man allerdings gerade auf molekularer Ebene noch viel zu wenig, um die komplexen

Mechanismen des Immunsystems zu verstehen. Doch diese Kenntnisse sind essenziell für eine wirkungsvolle Behandlung mit der körpereigenen Abwehr.

Bahnbrechend sind ebenfalls die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der *adoptive cell transfer* (ACT)¹². Hier gibt es zahlreiche Unterformen, die sogenannten TILs, TCRs, und CARs. Am weitesten fortgeschritten ist die CAR-T-Zell-Therapie. Diese ist ebenfalls eine Art der Immuntherapie. Dabei werden aus dem Blut des Patienten T-Zellen, Arbeitstiere des Immunsystems, isoliert und dann mittels eines inaktiven Virus genetisch verändert, sodass sie auf der Oberfläche bestimmte Rezeptoren produzieren, sogenannte chimeric antigen receptors (CARs). Es handelt sich hierbei um ein lebendiges Medikament. Die Zellen werden außerhalb des Patienten vermehrt und dann per Infusion verabreicht. Je nach Rezeptor attackieren sie verschiedene Zielzellen. So konnte ein Medikament entwickelt werden, das hochwirksam die Akute Lymphatische Leukämie bei Kindern therapiert. Bisher leider häufig ein Todesurteil. Nun können Kinder plötzlich überleben. Das erste Medikament hierzu wurde 2017 zugelassen, Kymriah® von Novartis. Der einzige Haken – es kostet 475.000 US\$. Doch eine Spritze reicht. Und wenn es nicht wirkt, muss die Kasse dafür nicht zahlen. In Zukunft werden CAR-Ts für weitere Anwendungen entstehen, vielleicht in Zukunft auch

¹²National Cancer Institute: CAR T Cells. Engineering Immune Cells to Treat Cancer (2017). <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/research/car-t-cells>. Zugegriffen: 27. Februar 2018.

für solide Tumore. Erste klinische Studien sind bereits im Gang, wo CAR-T-Zellen unabhängig von einem Individuum vorgefertigt werden und dann sofort applikationsbereit sind.

11.6 Wie sollen wir die Precision Medicine bezahlen?

Schaut man sich in der Welt um, so stellt man mit Erschrecken fest, dass der Zugang zu einer medizinischen Versorgung längst nicht die Regel ist – ganz zu schweigen vom Zugang zur Precision Medicine. Mehr als eine Milliarde Menschen sind von einer grundlegenden und bezahlbaren medizinischen Versorgung ausgeschlossen. Wenn schon die Hürden für den Zugang zu einer „normalen“ Medizin hoch sind, wie sieht es dann mit dem Zugang zur Precision Medicine aus?

Pothier zufolge existieren vier zentrale Hindernisse, die einen weltweiten Zugang zur Precision Medicine erschweren: Vorsorge, bildgebende Diagnostik, In-vitro-Diagnostik und Behandlungen. Diese vier Punkte bedürfen der genaueren Betrachtung. Polio-, Masern- und Pockenerkrankungen lassen sich heute mithilfe von Impfstoffen eindämmen oder gar völlig beseitigen. Mit den Impfstoffen werden gering modifizierte Versionen eines Virus oder eines Bakteriums in den menschlichen Kreislauf eingebracht. Dieser Prozess aktiviert das Abwehrsystem und die „harmlose“ Version des Erregers schützt den Menschen im Idealfall für den Rest seines Lebens. Doch wie so oft sind entsprechende Impfstoffe nicht zu

solchen Konditionen verfügbar, die eine Verfügbarkeit für alle Menschen möglich werden ließe. Die mangelnde Verfügbarkeit von Lagern und unzureichende medizinische Infrastrukturen erschweren die Sache zudem.

Als eines der größten Hindernisse für die flächen-deckende Verfügbarkeit von Precision Medicine gilt der Zugang zur In-vitro-Diagnostik. Die Geschichte der Verbreitung des HI-Virus – gerade in Afrika – gilt als Synonym für diese Problematik. Zielgerichtete Therapien setzen eine solide Diagnostik voraus. Neben der In-vitro- spielt die bildgebende Diagnostik eine zentrale Rolle bei der Erkennung von Krankheiten. Das Bildmaterial stammt überwiegend von MRI- und CT-Scans. Laut einer Studien werden weltweit jährlich 3,6 Mrd. Röntgenuntersuchungen durchgeführt, wobei drei Viertel der Menschheit von derlei Diagnosetechniken ausgeschlossen sind. Fehlt es an den notwendigen Informationen, die für eine fundierte Diagnose zwingend erforderlich sind, ist auch keine patienten- und krankheitsspezifische Behandlung möglich. Doch eine wichtige Grundlage für die Präzisionsmedizin ist die genomische Analyse. Zugang hierzu wird sogar in Europa (noch) nicht finanziert.

Das vierte wichtige Hindernis ist der unzureichende Zugang zu adäquaten Behandlungsmethoden. Das Beispiel HIV zeigt, dass trotz verfügbarer Behandlungsmethoden weite Teile Afrikas immer noch nicht über einen flächendeckenden Zugang verfügen. Dass es durchaus auch anders geht, zeigt das Beispiel China. 2013 hat die chinesische Regierung ein Programm aufgelegt, das insbesondere die medizinische Versorgung der ländlichen Bevölkerung verbessern soll. Dabei soll der Schwerpunkt

auf der Precision Medicine liegen (Bhoi et al. 2014). Aktuell sind neben einigen technischen Herausforderungen verschiedene Hürden beim Einsatz der Precision Medicine zu meistern. Auch regulatorische Hürden müssen genommen werden.

Doch viele haben die Zeichen erkannt. Die Europäische Kommission unterstützt die Precision Medicine, und viele der Länder haben dedizierte Initiativen zu Precision Medicine ins Leben gerufen (Nimmesgern et al. 2017). Wir stehen vor einer Revolution in der Medizin. Nicht nur technologisch, sondern auch wissenschaftlich. Die Herausforderungen werden enorm sein, einen einheitlichen Zugang zu gewähren. Doch ist mit der Wirksamkeit dieser neuen Medizin aller Grund gegeben, dass sie Teil unserer Gesundheitsversorgung wird.

11.7 Precision Medicine in der Praxis

Als bei dem Intel-Mitarbeiter Bryce Olson 2014 metastatischer Prostatakrebs der Stufe 4 diagnostiziert wurde, brach für den damals 44-jährigen Familievater eine Welt zusammen¹³. Zunächst hatte man versucht, die Erkrankung mit einem Mix aus traditionellen Methoden, wie Operation sowie Chemo- und Hormontherapie, einzudämmen. Es gelang, den Krebs in Schach zu halten,

¹³Oregon Health & Science University: Technology Powers Bioscience in Fight Against Cancer. <http://www.ohsu.edu/xd/health/services/cancer/about-us/news-events/technology-fights-cancer.cfm>. Zugegriffen: 26. Februar 2018.

doch Olsons Lebensqualität litt enorm unter den Nebenwirkungen. Die Krankheit kehrte immer wieder zurück und Olson entschied, sich keiner weiteren Chemotherapie zu unterziehen. Vielmehr beschloss er, eine progressive Behandlung auf Grundlage einer Gensequenzierung durchzuführen. Heute weiß man: Olson hatte die richtige Entscheidung getroffen.

Molekulare Krebstherapien, die auf Genom- und Tumorsequenzierungen basieren, gelten als Startschuss für die Ära der Präzisionsmedizin. Dieser Ansatz erlaubt eine optimal auf den Patienten abgestimmte Behandlung, bei der insbesondere genetische Informationen über spezifische Krebszellen, die bisherige Krankheitsgeschichte, die Lebensweise und weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Selbst in den USA, die nicht gerade für ein bevölkerungsfreundliches Gesundheitswesen bekannt sind, ist man sich des Potenzials bewusst. Der ehemalige US-Präsident Barack Obama bescheinigt der Precision Medicine bei der Einführung seiner *Precision Healthcare Initiative* im Januar 2015 enormes Potenzial: „Die Precision Medicine birgt eine der größten Chancen für bahnbrechende medizinische Fortschritte, die wir je gesehen haben.“¹⁴

Schon heute eröffnet Precision Medicine eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten. Bei Leukämie-Patienten lässt sich beispielsweise die Anzahl der weißen Blutzellen

¹⁴President Obama, Barack: Remarks by the President on Precision Medicine (2015) *The White House, Office of the Press Secretary*. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/01/30/remarks-president-precision-medicine>. Zugriffen: 25. Februar 2018.

wieder auf den Normalwert senken. Auch in der HIV-Forschung helfen Gentests den Ärzten, geeignete Kandidaten für einen neuen antiviralen Wirkstoff zu ermitteln. Precision Medicine löst einen grundlegenden Wandel im Gesundheitswesen aus: Das auf alle Patienten anwendbare Universalmodell wird durch einen personalisierten Behandlungsansatz abgelöst. Dabei profitiert dieser Ansatz von sinkenden Kosten und gleichzeitig deutlich geringerem Zeitaufwand. Ein Beispiel verdeutlicht den technologischen Fortschritt: Die Kosten für die erste Sequenzierung des menschlichen Genoms vor circa 20 Jahren kostete etwa 2,75 Mrd. EUR; der Prozess dauerte sage und schreibe 13 Jahre. Heute können die identischen Berechnungen (fast) an einem Tag durchgeführt werden und die Kosten belaufen sich auf nicht einmal 1000 EUR.

Olson hat die Erfahrung gemacht, dass Mediziner ihre Patienten häufig nicht auf verfügbare Tests hinweisen, mit denen die Ursachen für die Erkrankungen ermittelt werden könnten. Die Gründe dafür liegen zum einen an der unzureichenden Weiterbildung im Bereich der Genetik, zum anderen aber auch am Zeitmangel, an der Überlastung und an ungeklärten Fragen der Kostendeckung. Die Ärzte des Intel-Mitarbeiters gingen bei der Diagnose von einer maximalen Lebenserwartung von 21 Monaten aus.

Das Problem Kostendeckung kann bei Olson, immerhin Global Marketing Director des Chip-Herstellers, vernachlässigt werden. Er wandte sich an das renommierte Knight Cancer Institute der Oregon Health & Science University (OHSU), das international in der

Krebsforschung und -behandlung eine führende Rolle einnimmt. Die Forscher fanden heraus, dass der Krebs bei Olson einen Zellsignalisierungspfad nutzt, der bei Standardbehandlung keinerlei Wirkung zeigt. Damit war ein Ansatzpunkt gefunden, wie die Behandlung patientenspezifisch erfolgen kann. Olson konnte am Knight Cancer Institute geholfen werden: 16 Monate nach der Behandlung waren keine Anzeichen mehr für eine Erkrankung festzustellen.

Hinter Precision Medicine steckt auch der Gedanke, die Krankheitsdaten einem weltweiten Netzwerk zur Verfügung zu stellen, damit ein Onkologe aus Berlin auf die Ergebnisse seiner Kollegen aus Sydney, Tokio oder London zugreifen kann. Im Fall von Olson landeten seine anonymisierten Daten in der Collaborative Cancer Cloud. Dabei handelt es sich um eine Analyseplattform, die von Intel und dem Knight Cancer Institute für die gemeinsame Nutzung von Daten zu Krebserkrankungen entwickelt wurde. Die Collaborative Cancer Cloud erlaubt Institutionen den Austausch von Genom-, Bild- und sonstigen relevanten klinischen Daten, die dem Verständnis von Ursachen und Behandlungsmethoden dienen. Man kann sich leicht ausmalen, dass die Datenbestände gigantisch sind. Das menschliche Genom umfasst drei Milliarden Basenpaare, die sich in den dreiundzwanzig Chromosomenpaaren im Zellkern befinden. Aktuell sind einige Tausend Krebsgenome analysiert. Doch das ist längst nicht genug: Laut Dr. Brian Druker, dem Direktor des Knight Cancer Institute, werden mehr als eine Million Sequenzierungen benötigt – das ist zumindest das Ziel.

Für die Speicherung und Analyse werden hochmoderne IT-Systeme benötigt, die auch in der Lage sind, die gesammelten DNS- und Genomdaten zu bündeln. Sie müssen außerdem komplexe Aufgaben, wie den Vergleich von gesunden Zellen mit Tumorzellen und das Herausarbeiten von molekularen Unterschieden, leisten können. Die renommierten Wissenschaftler des Broad Institute, eines der weltweit größten Genomik-Forschungszentren, prognostizieren, dass bis 2025 jährlich ein Zettabyte (eine Trilliarde Bytes) an Daten generiert werden. Derart große Datenmengen sind nur mit High-Tech-Lösungen zu managen. Insofern hatte Olson Glück im Unglück, dass er quasi über den kleinen Dienstweg auf die technischen Möglichkeiten seines Arbeitgebers zurückgreifen konnte.

Bei Intel hat man ein interessantes Projekt aufgelegt, das auch von den Erfahrungen Olsons profitiert. Es nennt sich *All in one Day*¹⁵. Für Krebspatienten soll damit innerhalb eines Tages die auf die individuelle Erkrankung abgestimmte Behandlung ermittelt werden. Das Prozedere umfasst drei Schritte. Im ersten Schritt sucht der Patient einen Arzt auf, der die Gensequenzierung für ihn durchführt. Der zweite Schritt dient der Analyse des Erbguts. Dabei werden die krankheitsverursachenden Gene und die Schlüsselpfade für die Behandlung ermittelt. Im dritten und letzten Schritt werden – sofern verfügbar – die auf den Patienten abgestimmten Medikamente exakt bestimmt.

¹⁵Intel Corporation: All In One Day Precision Medicine for Cancer Patients. <https://www.intel.com/content/www/us/en/healthcare-it/solutions/infographics/all-in-one-day-medicine-infographic.html>. Zugriffen: 27. Februar 2018.

Mit den Handlungsempfehlungen kann der behandelnde Mediziner die optimale Behandlungsmethode bestimmen. Damit könnte Intels Plattform ein echter Durchbruch in der Precision Medicine gelingen.

Allerdings muss die Lösung verschiedene Herausforderungen meistern. Laut einem Artikel des Wall Street Journals sind 96 % der Krebspatientendaten nicht für die Forschung zugänglich. Die sichere gemeinsame Nutzung stellt die internationale Gemeinschaft daher vor erhebliche Aufgaben. Die zweite Herausforderung stellt die Datenmenge, ihre Verarbeitung und Speicherung sowie der Zugriff dar. Auch hier müssen im Sinne der Patienten Lösungen gefunden werden. Intels Ziel ist es, eine vollständige Analyse innerhalb von acht Stunden zu ermöglichen. Soweit ist man in der Praxis allerdings nicht. Die vollständige Sequenzierung inklusive der notwendigen Prozessanalyse kann bis zu zwei Wochen dauern. Wird das Genmaterial eines Patienten zweimal pro Jahr sequenziert, so entstehen dabei alleine zwei Terrabyte Daten. Neben der Collaborative Cancer Cloud nutzt Intels Ansatz drei weitere Werkzeuge: Cromwell ist eine Workflow Engine, die die Verarbeitungsschritte der Daten vereinfacht, GenomicsDB ist eine spezielle Datenbank, die für die Speicherung von Gendaten konzipiert wurde, und das Genome Analysis Toolkit ist für die eigentliche Datenanalyse zuständig. Die Ziele, die Intel mit dieser Plattform zu erreichen sucht, könnten die Krebsbehandlung rund um den Globus regelrecht revolutionieren. Im Idealfall werden in Zukunft nicht nur Intel-Mitarbeiter und eine zahlungsstarke Klientel in den Vorteil dieser Technik kommen, sondern auch andere Patienten.

Erstaunlicherweise werden diese technologischen Neuerungen, die einer Sensation gleichkommen, wenig öffentlich thematisiert. Olson, der sich heute intensiv für Menschen mit Krebserkrankungen einsetzt, setzt sich für bessere Aufklärung ein. Nach seiner Erfahrung haben viele Krebspatienten und die behandelnden Ärzte noch nichts oder nur wenig von Precision Medicine oder Gensequenzierung gehört. Er hat eine eigene Spendenaktion FACTS (Fighting Advanced Cancer Through Songs) ins Leben gerufen. Die Spenden fließen an Consano¹⁶, eine gemeinnützige Crowdfunding-Plattform für medizinische Forschung. FACTS hat sich inzwischen zu einem kleinen Festival entwickelt. Olsons Geschichte zeigt, welchen radikalen Umbruch Precision Medicine eingeleitet hat.

11.8 Kritische Stimmen

Gerne möchte man sich von der Euphorie manch wissenschaftlicher Studien und von Einzelberichten wie Olsons Geschichte anstecken lassen. Doch es gibt durchaus ernst zu nehmende Stimmen, die auch in Precision Medicine kein Allheilmittel sehen. Precision Medicine steht noch am Anfang einer vielversprechenden Entwicklung, dessen Ende bislang niemand seriös vorhersagen kann. Inzwischen gibt es ernst zu nehmende Belege dafür, dass die individuelle DNS-basierte Behandlung von Krebspatienten nur bei einem Teil der Patienten bessere

¹⁶<https://consano.org>.

Ergebnisse als traditionelle Behandlungsmethoden erzielt. Der aktuelle Hype um die Präzisionsmedizin klammert einen Aspekt häufig aus: Tumore können Resistenzen gegen Medikamente und Behandlungen entwickeln. Die Erfolgsquote wird also nicht immer so hoch ausfallen, wie erste Ergebnisse erwarten lassen.

Ein weiterer Aspekt grenzt die Ergebnisse, die Precision Medicine zum gegenwärtigen Zeitpunkt liefert, hinsichtlich der praktischen Verwendung ein: Selbst dann, wenn ein Mediziner ein entsprechendes System mit Patientendaten speist und das System eine ausreichend große Patientengruppe mit vergleichbarem Krankheitsbild und zuverlässige Prädiktoren für Krankheiten in dieser Datenmenge findet, muss er auch die Ergebnisse interpretieren können. Kritiker äußern Bedenken, dass die meisten Mediziner nicht in der Lage sind, die genetischen Testergebnisse zu verstehen. In der Medizinaus- und -fortbildung besteht also erheblicher Nachholbedarf.

Der Fairness halber muss man heute wohl sagen, dass Intels Vision von der Eintagesanalyse noch in weiter Ferne liegt. Maßgeschneiderte Behandlungen werden kommen, aber letztlich werden sie immer unter dem Kosten-Nutzen-Aspekt für die Allgemeinheit betrachtet. Nigel Paneth, ein Kinderarzt und Epidemiologe an der Michigan State University, bringt die Sache auf den Punkt: „Angenommen, ein Medikament oder eine Behandlung könnte das Diabetesrisiko um zwei Drittel senken, aber jede Behandlung würde 150.000 US\$ kosten – würde man diese Behandlung durchführen oder nicht, wenn sich das gleiche Ergebnis mit einer Diät und einem Bewegungsprogramm erzielen ließe?“

Die Lebenserwartung des Menschen hat in den letzten 50 Jahren um etwa ein Jahrzehnt zugenommen. Diese Zunahme hat wenig mit DNS-spezifischen Erkenntnissen zu tun. Vielmehr mit einem gesundheitsorientierten Leben und entsprechenden Rahmenbedingungen; auch mit dem Verzicht auf Rauchen, einem angemessenen Alkoholkonsum, mit Diäten und mit Bewegung. Paneth weiter: „Es sind ganz altmodische Dinge.“ Paneths Kritik und die anderer richtet sich keineswegs gegen Precision Medicine im Allgemeinen. Vielmehr warnen sie vor überhöhten Erwartungen, wie sie gerne von der Politik und Wirtschaft befeuert werden. Sicherlich ist es mittel- bis langfristig sinnvoll, medizinische Daten zu sammeln, zu analysieren und die entsprechenden Schlussfolgerungen daraus zu ziehen.

Doch wir werden immer Kritiker finden, wenn eine Disziplin rasche Fortschritte macht. Wenn wir uns vor Augen führen, was wir in den letzten zehn Jahren in der Medizin gelernt haben, so möchte ich glauben, dass wir auf einem exponentiellen Pfad sind.

11.9 Precision Medicine von Morgen

Die Erwartungen an Precision Medicine sind hoch – gerade von Seiten der Patienten –, weil sie hoffen, dass es endlich einen erfolgreichen Ansatz für die patientenbezogene Behandlung gibt. Verständlich: Manche Ergebnisse lassen eine vielversprechende Zukunft erhoffen, aber es existiert auch eine Vielzahl offener Fragen, auf die es bislang noch keine Antworten gibt. Sicher scheint aktuell

nur so viel, dass sich die Medizintechnologie mit großen Schritten weiterentwickeln wird – und zwar in allen Bereichen.

Der wichtigste Schritt ist, dass wir die Precision Medicine der breiten Masse zugänglich machen. Damit würden wir nicht nur die Gesundheitsversorgung verbessern, sondern auch unendlich mehr lernen. Die neuen Technologien müssen in den nächsten Jahren ihren Weg in die Klinik finden und wir müssen die verkrusteten Strukturen aufbrechen, welche einem auf datenbasierten Gesundheitssystem im Wege stehen. Heute wird der Großteil des Fortschritts durch einzelne Wissenschaftler und ihre Zeit bestimmt. Vielleicht können wir das Lernen und neue Erkenntnisse in der Zukunft mittels KI beschleunigen und von einzelnen Personen entkoppeln. Wenn wir so ein intelligentes System aufbauen, das aus der Fülle an – omics-Daten lernt, werden sich nicht nur neue Therapien ergeben, sondern auch neue Präventionsmaßnahmen im Rahmen der Precision Medicine.

In ferner Zukunft werden wir dann auch Krebs *präventiv* mit CRISPR oder Impfungen behandeln können. Die Frage ist nur, was mit uns als Gesellschaft geschieht, wenn wir alle über 100 Jahre leben.

Quellen und Literatur

Altman, Lawrence K.: David A. Hungerford Dies at 66; Found Genetic Change in Cancer (1993) *The New York Times*, 5. November 1993. <http://www.nytimes.com/1993/11/05/>

<obituaries/david-a-hungerford-dies-at-66-found-genetic-change-in-cancer.html>. Zugegriffen: 25. Februar 2018

Bettegowda, Chetan, Sausen, Mark, Leary, Rebecca J., Kinde, Isaac, Wang, Yuxuan, Agrawal, Nishant et al: Detection of Circulating Tumor DNA in Early- and Late-Stage Human Malignancies (2014) *Science Translational Medicine*, 6.224, 224ra24-224ra24. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3007094>

Bhoi, Nilakantha, Brand, Mark, Hu, Shanlian, Maksimova, Ludmila, Tannus Branco de Araújo, Gabriela, Doral Stefani, Stephen: Introduction to Health Systems of BRICS Countries (2014) *International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research (ISPOR)*. News Across Asia, Vol.3 No. 2. <https://www.ispor.org/consortiums/asia/Introduction-to-Health-Systems-of-BRICS-Countries.pdf>. Zugegriffen: 25. Februar 2018

Brahmer, Julie, Reckamp, Karen L., Baas, Paul, Crinò, Lucio, Eberhardt, Wilfried E. E., Poddubskaya, Elena et al: Nivolumab versus Docetaxel in Advanced Squamous-Cell Non-Small-Cell Lung Cancer (2015) *The New England Journal of Medicine*, 373.2, 123–35. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1504627>

Broad Institute. <https://www.broadinstitute.org/home>. Zugegriffen: 25. Februar 2018

Cherry, Gabe: Hacking Health Care (2017) *University of Michigan Precision Health*. <http://precisionhealth.umich.edu/feature-stories/hacking-health-care/>. Zugegriffen: 26. Februar 2018

Clish, Clary B.: Metabolomics. An Emerging but Powerful Tool for Precision Medicine (2015) *Cold Spring Harbor Molecular Case Studies*, 1.1, a000588. <https://doi.org/10.1101/mcs.a000588>

Collins, Heather, Calvo, Sherri, Greenberg, Kathleen, Neall, Lisa Forman, Morrison, Stephanie: Information Needs in the

Precision Medicine Era. How Genetics Home Reference Can Help (2016) Gunther Eysenbach (Hrsg.): *Interactive Journal of Medical Research*, 5.2, e13. <https://doi.org/10.2196/ijmr.5199>

Hasin, Yehudit, Seldin, Marcus, Lusis, Aldons: Multi-Omics Approaches to Disease (2017) *Genome Biology*, 18, 83. <https://doi.org/10.1186/s13059-017-1215-1>

Hausen, Harald zur: Rede anlässlich der Verleihung des Paul Ehrlich- und Ludwig Darmstaedter Preises 2015 (2015) *Goethe Universität Frankfurt am Main*. https://www.uni-frankfurt.de/54683629/NEURede_Eroeffnung_zurHausen.pdf. Zugegriffen: 25. Februar 2018

Intel Corporation: All In One Day Precision Medicine for Cancer Patients. <https://www.intel.com/content/www/us/en/healthcare-it/solutions/infographics/all-in-one-day-medicine-infographic.html>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

Kaiser, Jocelyn: A Human Has Been Injected with Gene-Editing Tools to Cure His Disabling Disease. Here's What You Need to Know (2017) *Science, American Association of Advancement of Science*. <<http://www.sciencemag.org/news/2017/11/human-has-been-injected-gene-editing-tools-cure-his-disabling-disease-here-s-what-you>>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

Metabolon (2017). <http://www.metabolon.com/>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

Mullin, Emily: CRISPR in 2018. Coming to a Human Near You (2017) *MIT Technology Review*. <https://www.technology-review.com/s/609722/crispr-in-2018-coming-to-a-human-near-you/>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

National Cancer Institute: CAR T Cells. Engineering Immune Cells to Treat Cancer (2017). <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/research/car-t-cells>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

National Human Genome Research Institute (NHGRI): Fact Sheet. Epigenomics (2016). <https://www.genome.gov/27532724/epigenomics-fact-sheet>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

National Human Genome Research Institute (NHGRI): Fact Sheet. Transcriptome (2015). <https://www.genome.gov/13014330/transcriptome-fact-sheet>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

Netto, George J., Schrijver, Iris (Hrsg.): Genomic Applications in Pathology (2015) Springer, New York

NIDDK: Digestive Diseases Statistics for the United States (2014) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/digestive-diseases> Zugegriffen: 27. Februar 2018

Nimmesgern, Elmar, Norstedt, Irene, Draghia-Akli, Ruxandra: Enabling Personalized Medicine in Europe by the European Commission's Funding Activities (2017) *Personalized Medicine*, 14.4, 355–65. <https://doi.org/10.2217/pme-2017-0003>

Nowell, Peter C.: Discovery of the Philadelphia Chromosome. A Personal Perspective (2007) *Journal of Clinical Investigation*, 117.8, 2033–35. <https://doi.org/10.1172/JCI31771>

Oregon Health & Science University: Technology Powers Bio-science in Fight Against Cancer. <http://www.ohsu.edu/xd/health/services/cancer/about-us/news-events/technology-fights-cancer.cfm>. Zugegriffen: 26. Februar 2018

President Obama, Barack: Remarks by the President on Precision Medicine (2015) *The White House, Office of the Press Secretary*. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/01/30/remarks-president-precision-medicine>. Zugegriffen: 25. Februar 2018

Sankawa, Yuri: Das Immunsystem – Wie entsteht antitumorale Immunität? (2014) *Oncology Research and Treatment*, 37(suppl 4).Suppl. 4, 2–5

Silver, Richard T.: Chronic Myeloid Leukemia (1992) *Current Opinion in Oncology*, 4.1, 66–72

Tempus. <https://www.tempus.com/index.html>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

The Medical Futurist: What Could CRISPR Do Tomorrow? (2016). <http://medicalfuturist.com/what-could-crisprcas9-do-tomorrow/>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

U.S. Department of Health & Human Services: What Is Precision Medicine? (2018) *Genetics Home Reference*. <https://ghr.nlm.nih.gov/primer/precisionmedicine/definition>. Zugegriffen: 26. Februar 2018

U.S. Food & Drug Administration: FDA Approves First Cancer Treatment for Any Solid Tumor with a Specific Genetic Feature (2017). <https://www.fda.gov/newsevents/newsroom/pressannouncements/ucm560167.htm>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

Wetterstrand, Kris: DNA Sequencing Costs. Data (2017) *National Human Genome Research Institute (NHGRI)*. <https://www.genome.gov/27541954/DNA-Sequencing-Costs-Data>. Zugegriffen: 27. Februar 2018

Wikipedia: \$1,000 Genome. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=\\$1,000_genome&oldid=808006657](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=$1,000_genome&oldid=808006657). Zugegriffen: 27. Februar 2018

Yourgenome: Timeline. History of Genomics (2016) <https://www.yourgenome.org/facts/timeline-history-of-genomics>. Zugegriffen: 26. Februar 2018



12

Technologieübergreifende Herausforderungen und Fragestellungen

Keine Frage: Der technologische Wandel hat nicht nur die Industrie und unseren Alltag erfasst, sondern auch die Medizin. Er eröffnet damit für das Gesundheitswesen ganz neue Möglichkeiten in der Früherkennung, Diagnose, Behandlung und Therapie. Verschiedene Technologien, wie beispielsweise die Nanotechnologie, stoßen gar das Tor in neue Dimensionen auf (im wahrsten Sinne des Wortes). Vieles von dem, was heute in den Forschungslaboren der Welt entsteht, wird in den medizinischen Alltag einziehen. Doch längst nicht alles, was möglich ist, wird auch für alle Menschen zugänglich werden. Es ist fast schon ein Paradoxon, dass die Zahl der ungeklärten Fragen größer als die technologischen Herausforderungen zu sein scheint.

Weit schwerer wiegen Fragen der Ethik, der Sicherheit, des Datenschutzes und der Grenze, wie weit Technik für

die Verbesserung, den Erhalt bzw. die Rückgewinnung von Gesundheit gehen darf. Völlig ungeklärt sind Fragen der Verschmelzung von Mensch und Technik. Wo sind die Grenzen, die nicht überschritten werden dürfen? Wie sieht es mit der Sicherheit der Technik im Allgemeinen und mit den personenbezogenen Daten im Besonderen aus? Wie verhält es sich mit den Kosten; oder wird in Zukunft nur der sich High-Tech-Medizin leisten können, der über die notwendigen finanziellen Mittel verfügt? Wer schützt uns davor, ein gläserner Patient zu werden? Wie vermeiden wir, Menschen aufgrund ihrer Gene zu diskriminieren? Wie geht man mit medizinischen Innovationen um? Fragen über Fragen, die einer gesamtgesellschaftlichen Diskussion unter Patienten, Forschern, den verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen und Unternehmen bedürfen.

12.1 Ethische Fragen

Vielleicht die prominenteste Person mit einem gravierenden Handicap war der renommierte Astrophysiker Stephen W. Hawking. Dem 1942 geborenen Briten wurde im Alter von 21 Jahren Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) diagnostiziert; eine degenerative Erkrankung des motorischen Nervensystems. Mediziner prophezeiten ihm, nur noch wenige Jahre zu leben¹. Die klassische Medizin

¹The Telegraph, UK News: Stephen Hawking to Retire as Cambridge's Professor of Mathematics (2008). <http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/3248858/Stephen-Hawking-to-retire-as-Cambridges-Professor-of-Mathematics.html>. Zugegriffen: 27. Januar 2018.

konnte Hawking kaum helfen. Dennoch ist die Entwicklung eines speziellen Sprachcomputers, den Hawking alleine durch die Bewegungen seines Wangenmuskels und seiner Augen steuerte, ein Beispiel, wo Technik ansetzen und Menschen unterstützen kann. Hawking haben wir unzählige wichtige Arbeiten zum Verständnis des Universums und der schwarzen Löcher zu verdanken.

Was für Hawking sein Sprachcomputer war, sind neuere medizintechnische Entwicklungen für die Menschheit von heute, morgen und übermorgen. Seit Jahren wird an sogenannten Brain Computer Interfaces, kurz BCI, geforscht (Wolpaw und Winter Wolpaw 2012). Diese Schnittstellen dienen der Übertragung von Hirnaktivitäten, die dann in Steuersignale umgewandelt werden können. Mithilfe solcher Signale können selbst hochgradig gelähmte Menschen Robotiksysteme steuern und mit ihrer Umwelt kommunizieren. Damit erlangen schwerstgeschädigte Menschen zumindest einen Teil ihrer Selbstständigkeit und Selbststimmung zurück. Sie empfinden jede noch so kleine Hilfe als echte Bereicherung. Am Beispiel BCI lassen sich einige ethische Probleme aufzeigen.

An BCI-Lösungen wird seit mehr als 15 Jahren gearbeitet. In der Anfangszeit basierten entsprechende Lösungen auf der Elektroenzephalografie, kurz EEG. Doch in der Praxis zeigte sich, dass jede Steckdose und jedes elektrische Gerät durch ein Störfeld die Wirkung negativ beeinflusst. Auch die niedrigen Datenübertragungsraten erwiesen sich beispielsweise bei der Implementierung eines Buchstabiersystems als kontraproduktiv. Die Signalanalyse gestaltete sich ebenfalls immer wieder als schwierig.

Neuere Entwicklungen verfolgen einen anderen Ansatz. Sie positionieren beispielsweise die ableitenden Elektroden unter der Schädeldecke (Vansteensel et al. 2016). Das Ergebnis sind weniger Störfelder und eine bessere Signalqualität. Seit einigen Jahren wird an invasiven BCI-Technologien geforscht. In den USA hat man beispielsweise ein System entwickelt, das Nadelelektroden in den Schädel einbringt. Die sogenannte Elektrokortikografie (ECoG) macht sich Elektrodennetze zunutze. Von Nachteil bei beiden Verfahren ist die Öffnung des Schädelns und das damit verbundene Infektionsrisiko. Die Forschungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass man mit ECoG auf einem vielversprechenden Weg ist. Dank des technischen Fortschritts werden die Elektroden immer kleiner. Man spricht daher auch von der Mikro-Elektrokortikografie (Micro-ECoG). In Verbindung mit drahtlosen Techniken können die Signale der Elektroden einfacher verarbeitet werden. Die Miniaturisierung erlaubt außerdem die deutliche Erhöhung der Elektrodenzahl.

Der Patient steuert das System durch Bewegungsvorstellungen. Die Vorstellung, eine Hand zu öffnen oder zu schließen, wird von dem System in Buchstaben umgesetzt. Der Patient muss „nur“ lernen, welche Vorstellung mit welchem Buchstaben verknüpft ist, und schon kann er mit der Außenwelt kommunizieren. Aktuell gehen die Entwicklungen dahin, adaptive Aspekte wie die Autovervollständigung und die Lernfähigkeit des Systems zu verbessern. Wie Studien zeigen, wünschen sich Schwerstgeschädigte primär die Kommunikationsfähigkeit zurück, noch vor künstlichen Roboterarmen oder anderen Hilfsmitteln. Dieser Aspekt ist für Behinderte und ihre Angehörigen emotional extrem wichtig.

Für die Mediziner stellt sich ein essenzielles Problem: Patienten mit entsprechenden Erkrankungen oder Verletzungen sind die komplexen Sachverhalte von Forschungsvorhaben und Studien nur schwer zu vermitteln. Das Erlangen einer ethisch vertretbaren Zustimmung ist kaum möglich. Dieser Sachverhalt stellt sich bei Patienten, welche wie Hawking an ALS leiden, anders dar, da hier ein gewisses Zeitfenster zur Verfügung steht. Prinzipiell müssen sich Mediziner mit Fragen auseinandersetzen, wer darüber entscheidet, wann welches System zum Einsatz kommt. Soll der Patient eine Technik selbst deaktivieren können? Was ist, wenn er dazu nicht in der Lage ist? Wer übernimmt die Entscheidungsgewalt bei Komplikationen? In Medizinerkreisen werden immer wieder Bedenken geäußert, dass die technische Entwicklung nicht der ethischen Aufarbeitung davongaloppieren dürfe. Hilfreich ist dabei sicherlich, die Perspektive des Patienten und dessen Umfeld anzunehmen.

Implantate sind unter regulatorischer Perspektive als *aktives Medizinprodukt* zu bewerten. In Europa ist die CE-Zertifizierung ein wichtiges Merkmal. Mit dieser Kennzeichnung sichert der Hersteller zu, dass das Produkt geltenden Vorschriften entspricht. Wird ein medizinisches Produkt mit diesem Label versehen, wird es nur noch über die Indikation reguliert. An dieser Stelle kollidieren die Interessen der ärztlichen Ethik und der Industrie, denn Unternehmen definieren die Indikation möglichst weit. Ärzte tendieren zu einer eher eng gefassten Indikation. Aber letztlich liegt es in der Verantwortung der klinischen Anwender, wie sie definiert wird. Von entscheidender Bedeutung ist daher die Definition des

Indikationsspektrums von medizinischen Innovationen. Hier stehen alle modernen Gesellschaften vor erheblichen Herausforderungen, denn noch ist vielfach ungeklärt, wann bestimmte Techniken medizinisch sinnvoll sind und wann nicht. In modernen Volkswirtschaften existieren überwiegend strenge Regulierungen, die insbesondere das Potenzial von Missbrauch so gering wie möglich halten sollen. Doch es gibt auch eine Vielzahl von wenig regulierten Medizinmärkten.

BCI und gehirnnahe Implantate können nicht nur zur Verarbeitung von Gehirnströmen und Signalen, sondern auch zur Stimulation verwendet werden. Hier eröffnen sich neue Anwendungsmöglichkeiten. Die tiefen Hirnstimulation kann beispielsweise für die Behandlung von Morbus Parkinson-Symptomen genutzt werden. Ein generelles Problem der Medizintechnik: Neue Entwicklungen werden auch zur Behandlung von anderen Krankheitsbildern verwendet. BCI-Techniken werden auch zur Behandlung von Depressionen, Zwangs- und Angsterkrankungen oder dem Tourette-Syndrom verwendet. Prinzipiell spricht nichts gegen eine Indikationsausweitung, solange wir als Gesellschaft in die Organe vertrauen, welche diese Erweiterung steuert. Das mag heute noch gut machbar sein, doch sobald wir uns in Gebiete bewegen, wo wir die Grenze der traditionellen Medizin überschreiten, wird dies schwierig. Unlängst hat die amerikanische Arzneimittelbehörde FDA die erste Studie im Menschen zugelassen, welche den Effekt von Metformin, ein älteres Medikament für Typ 2 Diabetes, auf die Lebenserwartung messen soll (Stevens 2016). Dabei handelt es sich nicht um eine

eigentliche medizinische Behandlung, sondern tatsächlich rein um die Frage, ob wir auch als gesunde Menschen mit Metformin länger leben.

Und zu guter Letzt: die Fragen rund um CRISPR. Wir haben darüber im Kap. 11 berichtet. Theoretisch werden wir damit das menschliche Erbgut für alle Ewigkeit ändern können. Die Folgen davon sind nicht absehbar. In den falschen Händen, könnten Leute versuchen, Superhumans oder Designbabys in die Welt zu setzen. Alles Dinge, die die meisten von uns wohl nicht möchten. Doch wie können wir das kontrollieren? Wahrscheinlich kaum. Es bleibt nur die Hoffnung auf die Vernunft derjenigen, die das Kapital haben, solche Vorhaben zu finanzieren.

12.2 Cybersecurity – Sicherheitsfragen

Der Einsatz von modernen Technologien ist immer auch mit Sicherheitsfragen verbunden. Wie sicher und ausgereift sind die neuen Techniken? Wie steht es um die Datensicherheit? Sind die Daten vor Angriffen von innen und außen ausreichend geschützt? Sind die Daten vor Diebstahl und Manipulation sicher? Wie steht es mit dem Datenschutz? Wie ist es um die Gerätesicherheit, Garantie, Wartung etc. bestellt? Wer ist bei Ausfällen, Insolvenzen und dergleichen Ereignissen Ansprechpartner für Mediziner und Patienten? Mit der zunehmenden Technisierung und steigender IT-Lastigkeit von Medizintechnik stellen sich neue Herausforderungen, die im Sinne des Patienten einer soliden Antwort bedürfen.

Insbesondere die zunehmende Vernetzung im Gesundheitswesen stellt Krankenhäuser und Arztpraxen, aber auch die Hersteller medizintechnischer Geräte und IT-Dienstleister, wie die Anbieter von Cloud-Plattformen, vor gewaltige Herausforderungen. Auch die Patienten müssen für die Gefahren sensibilisiert werden – gerade dann, wenn es um die Nutzung von Techniken wie IoT geht, die sich das Internet und internetbasierte Technik zunutze machen. Die Risiken sind indes gewaltig. Die Kosten, die durch Cyberkriminalität verursacht werden, gehen schon heute in die Milliarden – jährlich wohlgerne merkt. Laut dem Hiscox Cyber Readiness Report 2017 belaufen sie sich aktuell auf 450 Mrd. US\$ jährlich². Die durchschnittlichen Kosten sind in den letzten fünf Jahren um rund 200 % gestiegen. Und längst ist kein Ende in Sicht: Die Herjavec Group prognostiziert sogar bis 2021 jährliche Schäden in Höhe von sechs Billionen US-Dollar (Morgan 2017) – der Schaden berechnet sich aus Verlust von Daten, gestohlenem Geld, Produktivitätsverlust etc. Das wäre mehr, als der gesamte illegale Handel mit Drogen heute umsetzt. Cyberkriminalität wird damit zu einem kapitalen Risiko für die globale Wirtschaft. Sie ist in den USA bereits die am schnellsten wachsende Kategorie der Kriminalität und eine Umkehr dieses Trends ist nicht absehbar. Die Autoren des Berichtes gehen auch davon aus, dass es bereits hunderttausende, wenn nicht Millionen, Patienten gibt mit digital

²Hiscox Cyber Readiness Report 2017. Hiscox. <https://www.hiscox.de/hiscox-cyber-readiness-report-2017/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018.

überwachten Implantaten (implantable medical devices – IMDs), die drahtlos gehackt werden könnten. Dazu gehören Herzschrittmacher, Kardioverter und Defibrillatoren, Insulinpumpen oder Deep Brain-Stimulatoren. Wer die TV-Serie Homeland gesehen hat, bekommt eine Idee, was das bedeuten könnte. Das US Department of Homeland Security (DHS) musste deshalb bereits Untersuchungen einleiten und die Hersteller von ähnlichen Produkten haben angefangen, Lösungen zu suchen um Wireless-Hacking vorzubeugen (Knapton 2014).

Bei den Datenmengen, die täglich über das Internet transferiert werden, und immer komplexer werdenden Datenschemata versagen traditionelle deterministische Ansätze. Die Zahl der Bedrohungsvektoren, die sich durch die Mobilität, Social Media und virtualisierte Cloud-Netzwerke ergeben, macht die Sache nicht einfacher. Laut der Studie *2015 Cost of Cyber Crime Study* des Ponemon Institute dauert es durchschnittlich 46 Tage bis Datenverletzungen aufgedeckt werden³. Dieses kritische Risikofenster gilt es zu schließen. Sicher ist, dass Cyberkriminalität uns auch in Zukunft noch deutlich mehr beschäftigen wird – global aktive Großkonzerne genauso wie den niedergelassenen Hausarzt und den einzelnen Patienten. Ratingagenturen wie Standard and Poor oder Moody's erwägen sogar, die Kreditwürdigkeit von Banken und anderen Institutionen herabzustufen, sofern diese nicht gut gegen Cyberattacken gewappnet sind (Davis 2015).

³2015 Cost of Cyber Crime Study: Global (2015) Ponemon Institute. http://www.cnmonline.com/myresources/hpc/docs/HPE_SIEM_Analyst_Report_-_2015_Cost_of_Cyber_Crime_Study_-_Global.pdf. Zugegriffen: 27. Januar 2018.

Krankenhäuser als Ziel von Cyberattacken

Im Frühjahr 2014 veröffentlichte das Online-Magazin *Wired* eine Studie zur IT-Sicherheit in US-amerikanischen Krankenhäusern (Zetter 2014). Die Ergebnisse von zweijährigen Sicherheitstests fielen dramatisch aus: Medizinische Geräte weisen häufig unzureichend geschützte Schnittstellen auf, die sie von innen und außen angreifbar machen. Selbst Standardgeräte, wie beispielsweise Röntgengeräte, Operationsroboter und Infusionspumpen, waren häufig ungenügend geschützt.

Insbesondere Krankenhäuser sind sehr anfällig für Attacken von außen, denn dort kommen neben High-Tech-Systemen auch ältere Computer- und IT-Infrastrukturkomponenten zum Einsatz. Gerade diese älteren Systeme sind für Hacker mögliche Angriffsziele, weil die Angriffspunkte gut dokumentiert und mit frei verfügbaren Werkzeugen einfach zu nutzen sind. Da in der Medizintechnik immer häufiger auch Netzwerkfunktionalitäten zum Einsatz kommen, z. B. für Fernwartung, die Netzwerksicherheitsstandards aber oft auf einem Niveau aus Zeiten vor der Jahrtausendwende liegen, sind die Geräte ebenfalls angreifbar.

Die Öffnung von Medizingeräten für die Kommunikation mit Drittgeräten wird gelegentlich auch als Paradigmenwechsel bewertet. Das Zusammenwachsen von Medizintechnik und hochmodernen IT-Lösungen lässt die klassischen Grenzen zwischen beiden Welten verschwinden. Erschwert wird das Problem durch die zunehmende Nutzung von Cloud-Diensten, das Zusammenführen von Krankenhäusern und dem Betrieb von extrem heterogenen Lösungen (Williams und Woodward 2015). Das stellt

selbst routinierte Sicherheitsexperten vor erhebliche Herausforderungen. Zwar machen Gesetzgeber den Herstellern in spezifischen Medizinproduktegesetzen Vorschriften, welche sicherheitstechnische Belange zu erfüllen sind, doch die Komplexität können diese Vorgaben selten abbilden. Auch das Risikomanagement von Medizingeräten orientiert sich häufig am Gebrauch und nicht an den potenziellen Risiken. Hier ist ein grundlegendes Umdenken bei den Herstellern sowie bei den Gesetzgebern notwendig.

Am Beispiel der Fernwartung lassen sich reale Sicherheitsprobleme exemplarisch verdeutlichen. Fernwartung ist bei technischen Geräten eine einfache und kostengünstige Möglichkeit, die Funktionalität nahezu beliebiger Geräte aus der Ferne zu überwachen und sicherzustellen. Dazu werden die Geräte mit Fernwartungszugängen ausgestattet, und die Wartungstechniker kümmern sich aus dem Technikzentrum des Herstellers um alle wichtigen technischen Belange, spielen Updates auf, führen Tests durch etc. Je nach Standort einer medizinischen Einrichtung kommt bei der Fernwartung eine Vielzahl von gesetzlichen Vorgaben ins Spiel. Da Fernwartung längst über Ländergrenzen hinaus erfolgt, gilt die Entwicklung von internationalen Standards bislang als schwierig. Der einzige gangbare Weg scheint daher bis auf Weiteres der Abschluss individueller vertraglicher Vereinbarungen zwischen IT-Dienstleistern und medizinischen Einrichtungen.

Welche Punkte aber müssen dabei bedacht werden? Konkret ist bei Fernwartungszugängen aller Art darauf zu achten, dass diese nur temporär sind und eine Freischaltung nur zu bestimmten Zeitpunkten vorgesehen ist. Essenziell ist die Verwendung von hohen Sicherheitsstandards und

Verschlüsselungstechniken. Mit sogenannten Virtuell Privaten Netzwerken (VPN) kann man sichere Verbindungs-kanäle über das ansonsten unsichere Internet legen. Ein Problem stellt häufig das Aufspielen von Updates oder die Systemanalyse durch Security-Scanner dar, weil damit unter Umständen die Zweckbestimmung ausgehebelt wird. Die in Krankenhäusern zum Einsatz kommende IT ist häufig aus Mangel an Investitionen nicht auf dem neuesten technischen Stand und verfügt nicht immer über einen Malware-Schutz. Und falls doch, können Lebenserhal-tungssysteme nicht einfach vom Netz genommen werden, weil ein Virenbefall erkannt wurde. Sollte eine signifikante Anzahl an Geräten sich als unsicher erweisen, können sie im laufenden Krankenhausbetrieb nicht einfach ersetzt oder Ausfälle überbrückt werden.

Angesichts der zunehmenden Vernetzung sind die Häu-ser im Vorteil, die über geschultes Netzwerk- und Sicherheitspersonal verfügen, und zudem in der Lage sind, entsprechende Lösungen zu verwalten. Wie dramatisch die Folgen von Sicherheitslücken in medizinischen Gerä-ten sein können, zeigt das Beispiel des Einsatzes von Infusionspumpen in Intensivstationen. Im ungünstigsten Fall kann sich ein Hacker Zugriff zur Pumpensteuerung ver-schaffen und die Dosierung nach Belieben verändern.

In verschiedenen Krankenhäusern geht man daher den scheinbar einfachsten Weg: Man trennt die Netzwerke möglichst voneinander. Allerdings müssen die separier-ten Netzwerke, man spricht auch von Subnetzen, mit-einander kommunizieren können – eine vollständige Trennung ist also kaum möglich und wenig sinnvoll. Für den Sicherheitsbeauftragten in Krankenhäusern erschwert

ein weiterer Umstand die Implementierung eines vollumfänglichen Schutzes: Die meisten Medizinprodukte verwenden mehrere Schnittstellen, oft neben der standardinsbesondere herstellerspezifische Schnittstellen. Damit erhöht sich die Zahl der Angriffsvektoren.

Hersteller von Medizinprodukten haben inzwischen damit begonnen, Sicherheitsaspekte auf die Agenda zu setzen und orientieren sich bei Neuentwicklungen an aktuellen Sicherheitsstandards. Doch davon profitieren Krankenhäuser und Praxen erst in Zukunft. Aktuell sind sie gefordert, Sicherheitskonzepte für den Bestand zu entwickeln. Unter Medizinern werden tendenziell die Gefahrenpotenziale unterschätzt. Selbst Experten haben oftmals falsche Vorstellungen, wie einfach Sicherheitslücken aus der Ferne aufzudecken sind. Unter Nicht-IT-lern ist wenig bekannt, wie einfach Hacker-Werkzeuge heute nutzbar sind. Mit Penetration-Testing-Werkzeugkästen wie Kali Linux können auch weniger technisch versierte Personen sich als Hacker versuchen. Sicherlich sind zielgerichtete Attacken tendenziell unwahrscheinlicher als Schäden, die durch Viren und andere Malware verursacht werden. Doch sagen aktuelle Zahlen, dass in den USA geschätzt 94 % aller Gesundheitsinstitutionen bereits Opfer von Hackerangriffen waren (Filkins 2015).

Notwendigkeit von Sicherheitsstandards

Unter dem Oberbegriff *Coordinated Vulnerability Disclosure Policy* gehen immer mehr Kunden von Technikprodukten dazu über, einen „heißen Draht“ zum Hersteller zu schalten, über den mögliche Schwachstellen und Attacken an den Hersteller übermittelt und von diesem zeitnah

geprüft werden. Mithilfe von internationalen Normen wie der IEC 80.001 zum Risikomanagement von medizinischen IT-Netzwerken und der darauf basierenden DIN EN-Norm 80.000–1 wird versucht, eine enge Kooperation aller Beteiligten voranzutreiben. In den USA bringt das dortige Gesundheitsministerium mit der Veröffentlichung eines Richtlinienentwurfs die Diskussion voran⁴. Danach sollen Gerätehersteller auch nach dem Inverkehrbringen verpflichtet werden, mehr Engagement in Sachen Sicherheit an den Tag zu legen. Dabei verweist man insbesondere auf die Richtlinien der US-amerikanischen Standardisierungsbehörde NIST. Vergleichbare Entwicklung gibt es auch in anderen Industrienationen. In der Bundesrepublik Deutschland hat das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik beispielsweise den Leitfaden *Schutz Kritischer Infrastrukturen: Risikoanalyse Krankenhaus-IT* veröffentlicht⁵. Auch in der Schweiz wurden infrastrukturspezifische Leitfäden zur Sicherung kritischer Infrastrukturkomponenten, zu denen auch Krankenhäuser zählen, entwickelt.

Allerdings verursachen auch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen zusätzliche Kosten. Dieser Aspekt spielt in der

⁴U.S. Food and Drug Administration: FDA outlines cybersecurity recommendations for medical device manufacturers (2016). <https://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm481968.htm>. Zugegriffen: 27. Januar 2018.

⁵Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Schutz Kritischer Infrastrukturen. Risikoanalyse Krankenhaus-IT (2013). https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Broschueren/RisikoanalyseKrankenhaus.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Zugegriffen: 27. Januar 2018.

Diskussion bislang nur eine untergeordnete Rolle. Aber auch hier sind Lösungen notwendig.

Dass diese Bedrohung bereits Realität ist, zeigen die Pressemitteilungen von Ende 2016 (Cox 2018; Leetaru 2016)⁶. Mehrere große US-Kliniken wurden Opfer von sogenannten Ransomware-Attacken, so etwas wie digitale Geiselnahmen. Dabei platzieren Erpresser Viren oder Programme tief in den IT-Systemen der Kliniken und können diese lahmlegen, ohne dass die Klinik eine Chance hat, dieses Problem selbst zu lösen. Und wie wir bereits geschrieben haben, kann eine Klinik nicht *offline* sein. Patienten warten nicht mit Krankwerden. Deshalb haben sich die Kliniken, welche erpresst wurden, auch alle dazu entschlossen, den Forderungen (in Bitcoins) nachzugehen. Wie viele Kliniken bereits solche Ransomware in ihren Systemen haben, ist fraglich, aber mit Sicherheit eine beachtliche Zahl. Im August 2017 wurde der NHS Trust von Lanarkshire in Schottland von einer Cyberattacke getroffen (Dearden 2017). Die 650.000 Patienten des Einzugsgebiets von wurden gebeten, die Versorgungseinrichtungen nur im absoluten Notfall in Anspruch zu nehmen. Operationen und alle Patiententermine mit mussten abgesagt werden. Das gesamte System war lahmgelegt.

Doch hinter all den Cyberdiskussionen dürfen wir nicht vergessen: Der Mensch ist das schwächste Glied in der Sicherheitskette. Egal wie gut wir die Systeme gestalten,

⁶Leetaru, Kalle: Hacking Hospitals And Holding Hostages. Cybersecurity In 2016 (2016) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/kalevleetaru/2016/03/29/hacking-hospitals-and-holding-hostages-cybersecurity-in-2016/>. Zugegriffen: 22. Januar 2018.

der Mensch wird immer ein Risiko bleiben (Gow 2017). Ein faszinierendes Beispiel hierfür ist die Geschichte von Kevin Mitnick, lange der gesuchteste Hacker der Welt⁷, die in seinem Buch *The Ghost in the Wires* detailliert erzählt wird. Er konnte sich fast überall durch *Social Engineering* Zugang verschaffen, d. h. über die direkte Manipulation von Menschen. Er hörte sogar das FBI ab, um einer Verhaftung zu entkommen. Es wird also nicht genug sein, nur unsere IT-Systeme zu verbessern. Wir werden alle viel sensitiver sein müssen, wo und wann Hacker sich Zugang verschaffen könnten.

12.3 Der gläserne Patient – Fragen zum Datenschutz

Auch wenn das Thema Big Data erst allmählich in das öffentliche Bewusstsein dringt, konnte man in einem bemerkenswerten Beitrag in der New York Times lesen, dass Big Data in der medizinischen Praxis längst Einzug gehalten hat – zumindest teilweise. In dem Artikel wird Nicholas Tatonetti, Assistant Professor für Biomedizinische Informatik an der Columbia University in New York, mit folgenden Worten zitiert: „Heute können wir auf Daten zurückgreifen, die bereits in den elektronischen Patientendossiers gesammelt sind und daraus unsere Informationen beziehen.“ (Greenwood 2014). Anhand dieses

⁷Wikipedia: Kevin Mitnick (2018). https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kevin_Mitnick&oldid=822253517. Zugriffen: 22. Januar 2018.

Beispiels lässt sich sehr schön zeigen, dass der Grat zwischen Nutzen und Gefahren schmal ist.

Einerseits konnten Tatonetti und seine Kollegen mithilfe von Big Data-Technologien zeigen, dass das Anti-Depressivum Paxil und der Cholesterinsenker Pravastin bei kombinierter Einnahme zu einem erhöhten Blutzuckerspiegel führt. Die Ergebnisse lieferten moderne IT-Lösungen quasi auf Knopfdruck, wofür bei traditioneller Vorgehensweise jahrelange und teure Studien notwendig gewesen wären. Andererseits lösen Schlagwörter wie *elektronisches Patientendossier* oder *Quantified Self* bei Patienten, Kritikern und Datenschützern wenig Begeisterung aus. Sie fürchten – zu Recht –, dass Versicherungen diese Daten nutzen könnten, um individuell eine Eingruppierung in eine höhere Tarifklasse vorzunehmen. Diese Art der Diskriminierung verträgt sich kaum mit humanitären Grundsätzen.

Der Däne Søren Brunak von der Technischen Universität Dänemark in Lyngby beschäftigt sich schon längere Zeit mit dem Thema *Data Mining von elektronischen Patientendossiers*⁸. Üblicherweise werden Patientendaten in Studien anonymisiert, doch das ist längst nicht immer der Fall. Für Brunak besteht das Hauptproblem bei der kommerziellen Nutzung von Gesundheitsdaten darin, dass es viele geografische und ethnische Unterschiede gibt, welche zu versteckten, nicht gesundheitsrelevanten Variationen in den Daten führen. Verzichtet man auf die

⁸Brunak Group: Translational Disease Systems Biology. *University of Copenhagen*. <http://www.cpr.ku.dk/research/disease-systems-biology/brunak/>. Zugriffen: 27. Januar 2018.

Anonymisierung, lassen sich seiner Meinung nach bessere Ergebnisse erzielen, weil die Analyse beispielsweise auf einem statt auf mehreren Patiententypen basieren.

Im Sommer 2016 ging ein bislang einzigartiges Versicherungsprogramm der beiden Versicherer Discovery und Generali an den Start. Mit dem Programm *Generali Vitality* werden Kunden zu einem gesundheitsbewussteren Leben motiviert. Die Unternehmen sprechen von einer Smart-Insurance-Strategie: Der Kunde erhält durch aktive Fitnessmaßnahmen Bonusleistungen. Was auf den ersten Blick vielversprechend scheint, kann sich aber auch für den Versicherungsnehmer in das Gegenteil umkehren. Zum einen weiß der Versicherer genau über seinen Gesundheitszustand Bescheid, zum anderen könnten diejenigen benachteiligt werden, die sich dem Fitnessprogramm verweigern oder aus individuellen Gründen nicht mehr teilnehmen können. Die Skepsis, dass die gewonnenen Daten tendenziell eher dem Unternehmen als dem Kunden dienen, ist nicht unberechtigt.

Die Angst vor dem gläsernen Patienten steigt mit jeder neuen Information, die über ihn gespeichert wird. Datenschützer warnen seit Jahren vor der zentralen Erfassung von genetischen Informationen, die in Zukunft konkrete Aussagen über die Lebenserwartung, das Erkrankungsrisiko etc. erlauben. Dass solche Aussagen in Zukunft möglich werden, darin sind sich Experten einig, nur der genaue Zeitpunkt ist strittig.

Sicherlich ist der Zugriff auf personenbezogene Daten in Notfällen sinnvoll, wenn Patienten beispielsweise nach einem Verkehrsunfall oder einem Schlaganfall nicht mehr ansprechbar sind und keine Auskunft geben können.

In solchen Szenarien profitieren Notärzte und Mediziner von relevanten Informationen. Doch noch gibt es keine Lösungen dafür, wie der Patient Herr über seine Daten bleiben kann, wie dieses Recht exakt ausgestaltet werden sollte und wie er es durchsetzen kann.

Start-ups haben sich in der letzten Zeit auch dieses Themas angenommen. Ein spannendes Beispiel hierfür ist Luna DNA aus San Diego. Das Team will eine Datenbank aufbauen, welche den Nutzern gehört. Diese können dann ihre mittels Blockchain gesicherten genomischen Daten für die Forschung freigeben im Gegenzug für eine Cryptocurrency⁹. Doch auch wenn wir denken, unsere Daten seien anonymisiert, finden Unternehmen häufig Wege, diese mit den nicht-regulierten Daten aus Fitnesstrackern zu ergänzen und damit auch die Anonymisierung aufzuheben (Thielman 2017). Und dass sich das Geschäft mit den Gesundheitsdaten lohnt, ist außer Zweifel. Gesundheitsdaten sind im Darkweb wertvoller als Kreditkartendaten. Die Kreditkartendaten werden pro Karte für ein bis zwei US-Dollar gehandelt. Geschützte Gesundheitsdaten eines Patienten für 20–200 US\$ (Frieden 2016).

Niemand von uns will, dass seine privaten Gesundheitsdaten verkauft, geschweige denn unautorisiert gelesen werden. Aktuell gibt es noch viele Lücken, die dies ermöglichen. Doch wir können davon ausgehen, dass in den nächsten Jahren strengste Vorschriften helfen werden, Patientendaten wie Gold zu hüten. Leider werden wir sie damit umso attraktiver für den illegalen Handel machen.

⁹Luna DNA. <https://www.lunadna.com/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018.

12.4 Cyborgs – Die besseren Menschen?

Zahlreiche prominente Köpfe sind der Meinung, der Mensch müsse zum Cyborg werden, um relevant zu bleiben. So sagt z. B. Elon Musk, dass wir sonst zu den Hauskatzen von künstlicher Intelligenz werden (Solon 2017). Dass er dies ernst meint, zeigt er mit seinem Unternehmen Neuralink. Dort versucht er eine Verbindung zwischen Gehirn und Computer herzustellen. Jedoch nicht, um Patienten das Gehen oder Ähnliches zu ermöglichen. Nein, es geht darum, dem Menschen mehr Denkleistung zu geben durch direkten Zugang zu Computern. Dies ist Zukunftsmusik. Doch wenn wir zurückdenken, wurde dasselbe über Tesla oder SpaceX gesagt.

Tim O'Reilly, Autor des Buches *What's the future and why it's up to us?* sieht in KI ebenfalls die nächste Evolution des Wissens. Er sieht darin weniger eine Gefahr als die Möglichkeit, Wohlstand für unsere Gesellschaft zu generieren (O'Reilly 2017). Gemäß O'Reilly sind wir längst alle Cyborgs. Unsere Smartphones haben uns bereits dazu gemacht. Doch wie sehr diese Technologien unseren Alltag ändern können, zeigt ein schönes Beispiel aus seinem Buch. Tim Hwang, Programmierer und Jurist, hatte es sich zum Ziel gesetzt, seinen Job in einer Anwaltskanzlei überflüssig zu machen. Jedes Mal, wenn er eine Aufgabe bekam, versuchte er, diese durch Programmieren zu automatisieren. Er war erfolgreich. So erfolgreich, dass ihn die Kanzlei feuerte, denn sie lebt von Arbeitsstunden, die sie dem Kunden in Rechnung stellt.

Zurück zu den Cyborgs. Neil Harbisson ist ein Cyborg¹⁰. Er kann Farben hören. Dafür hat er sich eine Antenne implantieren lassen, die ihm erlaubt, aus dem, was er empfängt, Farben zu interpretieren. Daraus macht er Kunst.

In den USA leben 28,8 Mio. Menschen mit einem Hörgerät. Sie alle sind Cyborgs. Doch was, wenn wir Technologien nutzen, nicht um eine Einschränkung unserer natürlichen Fähigkeit zu überwinden, sondern uns „übernatürlich“ zu machen?

Sollte es wirklich dazu kommen, dass wir mittels der Technologien unsere Fähigkeiten ausbauen können, besteht natürlich die Gefahr, dass wir eine Asymmetrie in unserer Gesellschaft kreieren werden. Dann wäre der Film *Ironman*, in dem Robert Downey Jr. mittels eines Exoskelettons Superkräfte hat, keine Fiktion mehr. Wir werden diesen Fortschritt weder aufhalten, noch regulieren können. Wir können nur hoffen, dass er nicht nur den Superreichen vorbehalten sein wird, wie im Film, oder in falsche Hände fällt.

12.5 Ein langer Weg liegt vor uns

Die Medizintechnik hat in der Zukunft eine weitere Herausforderung zu meistern: Die verschiedenen Entwicklungszweige müssen zusammengeführt werden. Anhand

¹⁰AltexSoft: Reality Check. Are Cyborgs the Next Step in Human Evolution? (2017). <https://www.altexsoft.com/blog/engineering/reality-check-are-cyborgs-the-next-step-in-human-evolution/>. Zugriffen: 27. Januar 2018.

der sensorischen Rückkoppelung lässt sich das beispielhaft aufzeigen. Es existieren bereits Roboterhände, die mit Sensoren an den Fingerspitzen ausgestattet sind und diese Signale an den Teil des menschlichen Gehirns übertragen, der für die relevante Empfindung zuständig ist. Diese sensorische Rückkoppelung ist für den Patienten sehr wichtig, weil andernfalls die Bewegungen als fremd empfunden werden. Die verschiedenen Techniken und Entwicklungen müssen aufeinander abgestimmt sein. Das macht eine enge Koordination der beteiligten Unternehmen notwendig – auch wenn das in der Praxis über Unternehmensgrenzen hinweg nicht einfach zu realisieren ist. Die praktische Umsetzung solcher Vorgaben wird Jahre dauern. Daher sind Mediziner und Gerätehersteller aufgerufen, im Rahmen einer Entwicklungspartnerschaft eine Roadmap zu entwickeln, in der die sicherheitsspezifischen Eckdaten abgestimmt sind.

Neben rein technologischen und ethischen Aspekten stellt sich für die Medizintechnik von morgen generell die Frage, wie der Umgang mit Innovationen erfolgen soll. Wirft man einen Blick zurück in die Vergangenheit, zeigt sich, dass blindem Zukunftsoptimismus und prinzipieller Abwehrhaltung schon immer angemessene Neugier und gesunde Skepsis gegenüberstanden. Die Medizintechnik hat in der Vergangenheit eine gewaltige Innovationsleistung vollbracht. Allerdings wird der Begriff der Innovation heute von der Politik und Wirtschaft inflationär verwendet. Meist wird er mit der Hoffnung auf „bessere Zeiten“ und mit wirtschaftlichen Aspekten verknüpft. Dabei haben Innovationen per se eine positive Bedeutung. In der Betriebswirtschaft verbindet man Innovationen mit

Neuentwicklungen, die idealerweise finanzielle Früchte tragen sollen. Ärzte und Wissenschaftler interpretieren Innovationen schlicht als nützliche Neuerungen, ohne primär nach dem Preis zu fragen. An dieser Grundhaltung sollten sich zukünftige Entwicklungen von medizinischen Lösungen weiter orientieren.

Über einen Kerntreiber der medizinischen Innovation wird in diesem Kontext selten nachgedacht: der Patient als Innovator. Habicht et al. berichten, welche Innovationen Patienten hervorgebracht haben (Habicht et al. 2012). Sie erzählen die Geschichte eines Tauben, der eine Software entwickelt, mit deren Hilfe taube Schüler leichter am Schulunterricht teilnehmen können. Sie berichten von einer Frau, die nach einer Brustkrebsoperation ein Hemd entwirft, das sogenannte ShowerShirt, mit dem man in der Zeit nach der OP duschen kann. Und sie beschreiben, wie ein querschnittsgelähmter Mann eine *elektronische Hose* baut, mit der er laufen kann. Bei allen diesen Beispielen haben betroffene Menschen innovative Leistungen hervorgebracht, von denen andere Patienten profitieren sollen. Habicht zeigt anhand von acht Innovationen aus dem Gesundheitsbereich, wie Patienten zu Innovatoren werden und wichtige Anstöße für die praktische Entwicklung von innovativen medizinischen Hilfsmitteln geben. Die Innovationskraft der Patienten ist ein bislang wenig erschlossenes Potenzial.

Es ist mehrfach in diesem Buch angeklungen: Die Entwicklungen neuer Technologien verlangt nach Experten, die diese Technik einzusetzen verstehen. Je techniklastiger die Medizin und die medizinische Behandlung werden, umso mehr benötigt man Spezialisten, die in beiden

Welten zu Hause sind: Sie müssen etwas von Medizin und etwas von Technik verstehen. Gefragt sind Generalisten mit fundiertem Wissen aus beiden klassischen Berufsfeldern. Der Mediziner der Zukunft wird eher wie ein Dirigent agieren, der das Orchester zur Höchstleistung treibt als wie ein Musiker, der ein einzelnes Instrument virtuos bespielt. Wahrscheinlich werden wir in Zukunft auch mehr Mathematiker oder Programmierer sehen, als wir denken. Die Technologien, die wir bisher betrachtet haben, werden die gesamte Industrie umkrempeln. So werden neue Berufsbilder entstehen (müssen). In der universitären Ausbildung ist man auf diesen Paradigmenwechsel noch nicht ausreichend eingestellt. Sicher: Hier und da wird bereits an Robotiksystemen geschult, aber der Mediziner von morgen wird etwas von IT und Internettechnologien verstehen müssen. Er wird die Möglichkeiten, aber auch die Tücken kennenlernen, die die Technik bietet. Die Medizinerausbildung wird sich über kurz oder lang neu ausrichten müssen, damit auch Mediziner verfügbar sind, die das technische Instrumentarium bespielen können. Doch werden die Universitäten vielleicht gar nicht der Treiber der Innovation und Ausbildung sein. Elon Musk hat die Automobilbranche und die Raumfahrt auf den Kopf gestellt. Er hat in keinem der beiden Bereiche eine Ausbildung. Und so werden wir vermehrt junge Unternehmer sehen, die erfolgreich das Gesundheitswesen umkrempeln, neu definieren und vielleicht wie Google die Websuche, das Gesundheitswesen als solches dominieren.

Eine abschließende Frage soll noch aufgeworfen werden: Wer soll das bezahlen? High-Tech kostet Geld, meist sogar richtig viel Geld. Die Kosten für den Einsatz

neuester Technologien sind beträchtlich. Selbst, wenn Exoskelette eine hohe Reife besitzen, wird man nicht jedem Patienten ein solches zur Verfügung stellen können. Man wird auch nicht jeden Patienten mit Nanotechnologien oder mit Robotiksystemen behandeln oder operieren können. Die Frage, welches medizintechnische Niveau sich eine Volkswirtschaft leisten kann und will, wird von Gesellschaft zu Gesellschaft entschieden werden müssen. Dabei werden – wie so oft – viele Patienten außen vor bleiben. Schon heute existieren in vielen Industrienationen Gesundheitswesen mehrerer Klassen. Man wird sich damit abfinden müssen, dass nicht jeder Patient die menschen- bzw. technisch mögliche Leistung erhalten wird. Daran wird auch der technologische Fortschritt der Medizintechnik nichts Grundlegendes ändern. Doch besteht die Hoffnung, dass wir z. B. mittels KI unnötige Kosten im System maßgeblich senken können.

Der technologische Fortschritt ist nur eine Seite des Gesundheitssystems. Er ist nicht aufzuhalten und wird in mehr oder minder großen Schritten voranschreiten. Doch noch sind eine Vielzahl von Technik übergreifenden Fragen zu klären und Herausforderungen zu meistern. Ethische Fragestellungen stehen dabei im Mittelpunkt. Gesellschaften müssen sich Fragen stellen, wie weit eine medizinische Behandlung gehen darf und wo die Grenzen des Machbaren und Sinnvollen sind. Die Idealvorstellung wäre eine ausgewogene Balance zwischen Technologie auf der einen Seite und den Interessen des Patienten auf der anderen Seite. Für die Zukunft würde man sich außerdem eine deutlich stärker interdisziplinär geprägte Zusammenarbeit wünschen.

Quellen und Literatur

2015 Cost of Cyber Crime Study: Global (2015) *Ponemon Institute*. http://www.cnmonline.com/myresources/hpe/docs/HPE_SIEM_Analyst_Report_-_2015_Cost_of_Cyber_Crime_Study_-_Global.pdf. Zugegriffen: 27. Januar 2018

AltexSoft: Reality Check. Are Cyborgs the Next Step in Human Evolution? (2017). <https://www.altexsoft.com/blog/engineering/reality-check-are-cyborgs-the-next-step-in-human-evolution/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Brunak Group: Translational Disease Systems Biology. *University of Copenhagen*. <http://www.cpr.ku.dk/research/disease-systems-biology/brunak/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Schutz Kritischer Infrastrukturen. Risikoanalyse Krankenhaus-IT (2013). https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Broschueren/RisikoanalyseKrankenhaus.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Cox, John Woodrow, Turner, Karen, Zapotosky, Matt: Virus Infects MedStar Health System's Computers, Forcing an Online Shutdown (2018) *Washington Post*, 28. März 2016, section Local. https://www.washingtonpost.com/local/virus-infects-medstar-health-systems-computers-hospital-officials-say/2016/03/28/480f7d66-f515-11e5-a3ce-f06b5ba21f33_story.html. Zugegriffen: 22. Januar 2018

Davis, Jeremy Seth: Moody's. Cyber Risks Will Impact Credit Ratings (2015) *SC Media US*. <https://www.scmagazine.com/news/moodys-cyber-risks-will-impact-credit-ratings/article/533112/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Dearden, Lizzie: NHS Trust Hit by Cyber Attack Cancels Operations and Asks Patients Not to Come to Hospital ,Unless It Is Essential‘ (2017) *The Independent*. <http://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/cyber-attacks-uk-nhs-lanarkshire-scotland-hospitals-affected-patients-operations-ransomware-wannacry-a7913896.html>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Filkins, Barbara: Health Care Cyberthreat Report (2015) *SANS Institut*. <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/firewalls/health-care-cyberthreat-report-widespread-promises-detected-compliance-nightmare-horizon-34735>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Frieden, Joyce: Health Data Is More Valuable Than You May Think (2016). <https://www.medpagetoday.com/meetingcoverage/himss/56496>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Greenwood, Veronique: Can Big Data Tell Us What Clinical Trials Don’t? (2014) *The New York Times*, 3 October 2014, section Magazine. <https://www.nytimes.com/2014/10/05/magazine/can-big-data-tell-us-what-clinical-trials-dont.html>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Gow, James W.: Humans. The Weakest Link in Social Engineering and Cyber Attacks (2017) *Davis-Dyer-Max Inc.* <http://www.davis-dyer-max.com/blog/default.aspx?entry=2C29692A-7545-4A9D-BEB0-2DAED905DC2F&rule-=29211382>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Habicht, Hagen, Oliveira, Pedro, Shcherbatiuk, Viktoriia: User Innovators: When Patients Set Out to Help Themselves and End Up Helping Many (2012): Social Science Research Network, 27 August 2012, Rochester, NY. <https://papers.ssrn.com/abstract=2144325>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Hiscox Cyber Readiness Report 2017. *Hiscox*. <https://www.hiscox.de/hiscox-cyber-readiness-report-2017/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Knapton, Sarah: Terrorists Could Hack Pacemakers like in Homeland, Say Security Experts (2014) section News. <http://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/11212777/Terrorists-could-hack-pacemakers-like-in-Homeland-say-security-experts.html>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Leetaru, Kalle: Hacking Hospitals And Holding Hostages. Cybersecurity In 2016 (2016) *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/kalevleetaru/2016/03/29/hacking-hospitals-and-holding-hostages-cybersecurity-in-2016/>. Zugegriffen: 22. Januar 2018

Luna DNA. <https://www.lunadna.com/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Morgan, Steve: Cybercrime Damage Costs \$6 Trillion in 2021 (2017) *Cybersecurity Ventures*. <https://cybersecurityventures.com/hackerpocalypse-cybercrime-report-2016/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

O'Reilly, Tim: What Will Our Lives Be Like as Cyborgs? (2017) *The Atlantic*, 27 October 2017. <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2017/10/cyborg-future-artificial-intelligence/543882/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Solon, Olivia: Elon Musk Says Humans Must Become Cyborgs to Stay Relevant. Is He Right? (2017) *The Guardian*. section Technology. <https://www.theguardian.com/technology/2017/feb/15/elon-musk-cyborgs-robots-artificial-intelligence-is-he-right>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Stevens, Judy: Anti-Aging Human Study on Metformin Wins FDA Approval (2016) *LifeExtension Magazine*. <http://www.lifeextension.com/magazine/2016/3/anti-aging-human-study-on-metformin-wins-fda-approval/page-01>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

The Telegraph, UK News: Stephen Hawking to Retire as Cambridge's Professor of Mathematics (2008). <http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/3248858/Stephen-Hawking-to-retire-as-Cambridge-Professor-of-Mathematics.html>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Thielman, Sam: Your Private Medical Data Is for Sale – and It's Driving a Business Worth Billions (2017) *The Guardian*. <http://www.theguardian.com/technology/2017/jan/10/medical-data-multibillion-dollar-business-report-warns>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

U.S. Food & Drug Administration: FDA outlines cybersecurity recommendations for medical device manufacturers (2016). <https://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm481968.htm>. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Vansteensel, Mariska J., Pels, Elmar G.M., Bleichner, Martin G., Branco, Mariana P., Denison, Timothy, Freudenburg, Zachary V. et al: Fully Implanted Brain–Computer Interface in a Locked-In Patient with ALS (2016) *New England Journal of Medicine*, 375.21, 2060–66. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1608085>

Wikipedia: Kevin Mitnick (2018). https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kevin_Mitnick&oldid=822253517. Zugegriffen: 27. Januar 2018

Williams, Patricia A.H., Woodward, Andrew J.: Cybersecurity Vulnerabilities in Medical Devices. A Complex Environment and Multifaceted Problem (2015) *Medical Devices (Auckland, N.Z.)*, 8, 305–16. <https://doi.org/10.2147/MDER.S50048>

Wolpaw, Jonathan R., Winter Wolpaw, Elizabeth (Hrsg.): Brain-Computer Interfaces. Principles and Practice (2012) Oxford University Press, Oxford, New York

Zetter, Kim: It's Insanely Easy to Hack Hospital Equipment (2014) *WIRED*. <https://www.wired.com/2014/04/hospital-equipment-vulnerable/>. Zugegriffen: 27. Januar 2018