

HEFT 26 EIN WÖCHENTLICHES SAMMELWERK ÖS 25 SFR 3.50 DM 3

# WIE GEHT DAS

Technik und Erfindungen von A bis Z  
mit Tausenden von Fotografien und Zeichnungen



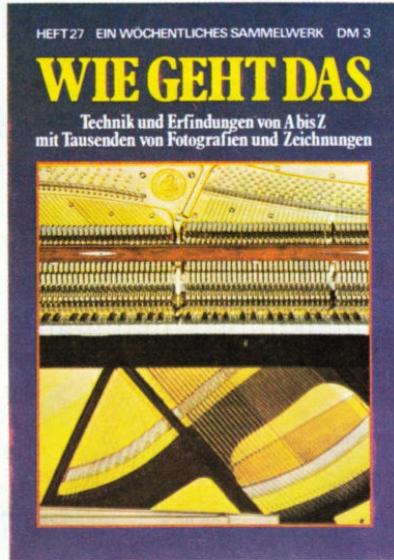
---

scan:[GDL]

# WIE GEHT DAS

Interferometer	701
Ionen und Ionisation	703
Ionenantrieb	705
Isolator, elektrischer	707
Isotope	708
Kaffee	710
Kältetechnik	712
Kanäle	716
Kapazität, elektrische	721
Kardangelenke	724
Kastenträger-brücke	726

## In Heft 27 von Wie Geht Das



Das Klavier ist eines der vielseitigsten und wichtigsten modernen Musikinstrumente. Die Entwicklung des Klaviers und seine sich über die Jahrhunderte ändernde Bauweise werden in Heft 27 von Wie Geht Das beschrieben.

Die sogenannte Kettenreaktion, die zwischen den Kernen der Atome bestimmter Elemente stattfindet, wie zwischen Uran- oder Plutoniumisotopen, ist die Grundlage zur Erzeugung der Atomkraft. Wenn Sie wissen wollen, wie es zu Kettenreaktionen kommt und wie man sie kontrollieren und nutzen kann, lesen Sie das nächste Heft von Wie Geht Das.

### WIE SIE REGELMÄSSIG JEDO WOCHE IHR HEFT BEKOMMEN

WIE GEHT DAS ist eine wöchentlich erscheinende Zeitschrift. Die Gesamtzahl der 70 Hefte ergibt ein vollständiges Lexikon und Nachschlagewerk der technischen Erfindungen. Damit Sie auch wirklich jede Woche Ihr Heft bei Ihrem Zeitschriftenhändler erhalten, bitten Sie ihn doch, für Sie immer ein Heft zurückzulegen. Das verpflichtet Sie natürlich nicht zur Abnahme.

### ZURÜCKLIEGENDE HEFTE

Deutschland: Das einzelne Heft kostet auch beim Verlag nur DM 3. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: Verlagsservice, Postfach 280 380, 2000 Hamburg 28. Postscheckkonto Hamburg 3304 77-202. Kennwort: HEFTE.

Österreich: Das einzelne Heft kostet öS 25. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: WIE GEHT DAS, Wollzeile 11, 1011 Wien. Postscheckkonto: Wien 2363 130. Oder legen Sie bitte der Bestellung einen Verrechnungsscheck bei. Kennwort: HEFTE.

Schweiz: Das einzelne Heft kostet sfr 3,50. Bitte überweisen Sie den Betrag durch die Post (grüner Einzahlungsschein) auf das Konto Schmidt-Agence AG, Kontonummer Basel 40-879, und schicken Sie Ihre Bestellung unter Einsendung Ihres Abschnitts an die Schmidt-Agence AG, Postfach, 4002 Basel. Kennwort: HEFTE.

**Wichtig:** Der linke Abschnitt der Zahlkarte muß Ihre vollständige Adresse enthalten, damit Sie die Hefte schnell und sicher erhalten.

### INHALTSVERZEICHNIS

Damit Sie in WIE GEHT DAS mit einem Griff das gesuchte Stichwort finden, werden Sie mit der letzten Ausgabe ein Gesamtinhaltsverzeichnis erhalten. Darin einbezogen sind die Kreuzverweise auf die Artikel, die mit dem gesuchten Stichwort in Verbindung stehen. Bis dahin schaffen Sie sich ein Inhaltsverzeichnis dadurch, daß Sie die Umschläge der Hefte abtrennen und in der dafür vorgesehenen Tasche Ihres Sammelordners verwahren. Außerdem können Sie alle 'Erfindungen' dort hineinlegen.

### SAMMELORDNER

Sie sollten die wöchentlichen Ausgaben von WIE GEHT DAS in stabile, attraktive Sammelordner einheften. Jeder Sammelordner faßt 14 Hefte, so daß Sie zum Schluß über ein gesammeltes Lexikon in fünf Ordern verfügen, das Ihnen dauerhaft Freude bereitet und Wissen vermittelt.

### SO BEKOMMEN SIE IHRE SAMMELORDNER

1. Sie können die Sammelordner direkt bei Ihrem Zeitschriftenhändler kaufen (DM 11 pro Exemplar in Deutschland, öS 80 in Österreich und sfr 15 in der Schweiz). Falls nicht vorrätig, bestellt der Händler gern für Sie die Sammelordner.

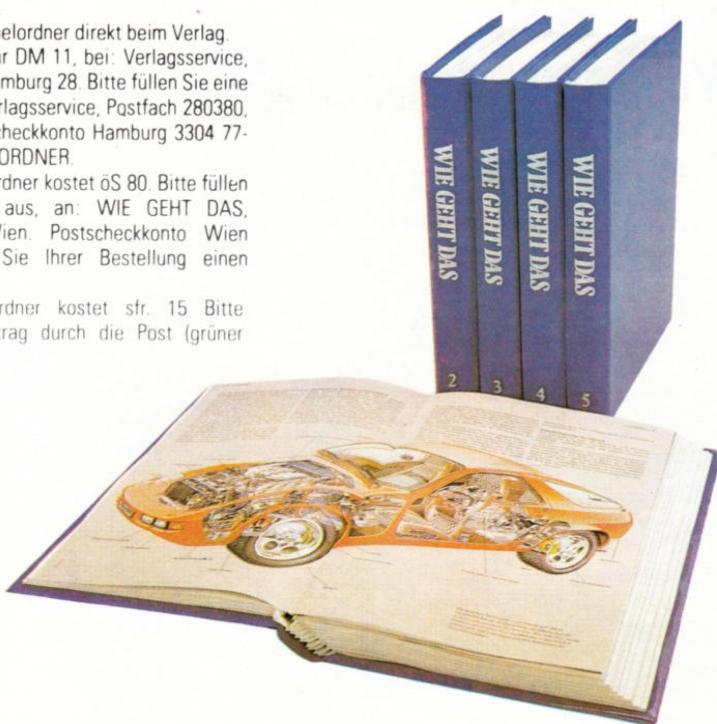
2. Sie bestellen die Sammelordner direkt beim Verlag. Deutschland: Ebenfalls für DM 11, bei: Verlagsservice, Postfach 280380, 2000 Hamburg 28. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: Verlagsservice, Postfach 280380, 2000 Hamburg 28, Postscheckkonto Hamburg 3304 77-202. Kennwort: SAMMELORDNER.

Österreich: Der Sammelordner kostet öS 80. Bitte füllen Sie eine Postzahlkarte aus, an: WIE GEHT DAS, Wollzeile 11, 1011 Wien. Postscheckkonto Wien 2363 130. Oder legen Sie Ihrer Bestellung einen Verrechnungsscheck bei.

Schweiz: Der Sammelordner kostet sfr. 15. Bitte überweisen Sie den Betrag durch die Post (grüner

Einzahlungsschein) auf das Konto Schmidt-Agence AG, Kontonummer Basel 40-879, und schicken Sie Ihre Bestellung unter Einsendung des Abschnitts an die Schmidt-Agence AG, Postfach, 4002 Basel. Kennwort: SAMMELORDNER.

**Wichtig:** Der linke Abschnitt der Zahlkarte muß Ihre vollständige Adresse enthalten, damit Sie die Sammelordner schnell und sicher bekommen. Überweisen Sie durch Ihre Bank, so muß die Überweisungskopie Ihre vollständige Anschrift gut leserlich enthalten.



# INTERFEROMETER

**Die Messung von Abständen unter einem Millionstel Meter und die Untersuchung der Struktur weit entfernter Objekte des Universums sind nur zwei der vielen Anwendungsmöglichkeiten moderner Interferometer.**

Wenn zwei Wasserwellen gleichzeitig in einem bestimmten Punkt der Wasseroberfläche ankommen, hebt oder senkt sich dieser Punkt entsprechend der Summe der Bewegungen, die er durch die Wirkung der Einzelwellen zu vollführen hätte. Das gleiche Prinzip gilt auch für andere Wellenerscheinungen, insbesondere für ELEKTROMAGNETISCHE WELLEN (z.B. LICHT, Radiowellen). So können sich beispielsweise zwei Radiowellen von zwei auf der Frequenzskala benachbarten Sendestationen in einem Empfänger überlagern und sich abwechselnd addieren und subtrahieren. Diese regelmäßige, als Schwebung bekannte Erscheinung wird im LAUTSPRECHER als Pfeifton wiedergegeben; die beiden Radiostationen interferieren.

## Das Michelson-Interferometer

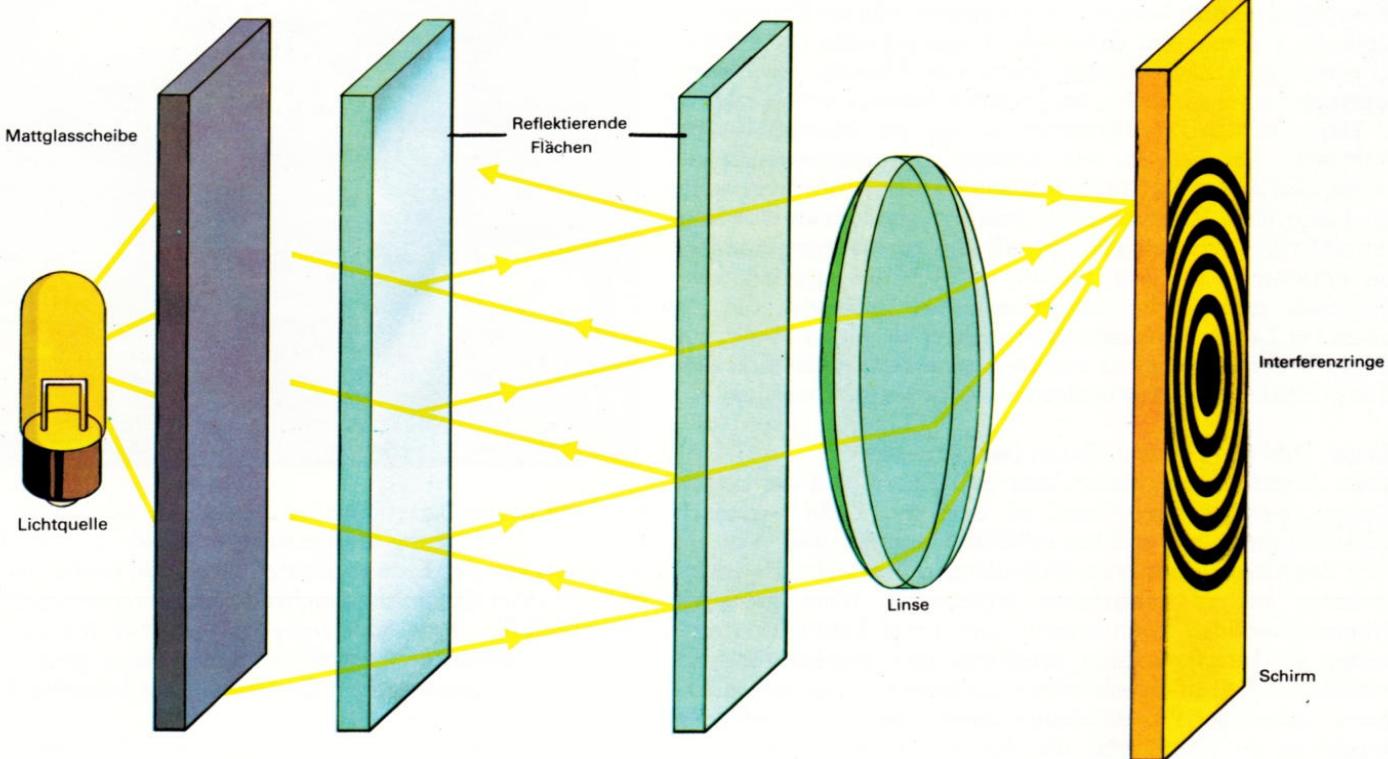
Ein Gerät, das zur Nutzung der Interferenzeffekte konstruiert ist, heißt Interferometer. Interferometer werden in vielen

Bereichen der Technik und der Forschung, wo es um die Messung von Abständen oder Winkeln geht, benutzt. Es gibt viele verschiedene Formen dieser Geräte. In der Michelsonschen Version eines Interferometers wird ein einzelnes Lichtbündel durch einen unvollständig reflektierenden, halbdurchlässigen Spiegel in zwei Teilbündel zerlegt. Die beiden Wellenzüge fallen dann auf voll reflektierende Spiegel und werden zur Überlagerung gebracht. Die aus der Interferenz der beiden Teilbündel entstehende Intensitätsverteilung zeigt helle und dunkle Ränder (Interferenzstreifen), wo die Wellen sich gegenseitig verstärken oder aufheben. Die Sichtbarkeit der Streifen, der Kontrast zwischen hellen und dunklen Bereichen, hängt von der spektralen Reinheit des Lichtes ab, also davon, wie schmal der vorhandene Wellenlängenbereich ist. Tritt nur eine einzige Wellenlänge, eine perfekte Spektrallinie (siehe SPEKTROSKOPIE) im Strahl auf, erhält man vollständigen Kontrast. In Wirklichkeit kommt dieser Fall aber nicht vor. Schon Michelson konnte zeigen, daß viele der Spektrallinien, die man als perfekt angesehen hatte, tatsächlich aus mehreren Linien bestehen oder eine messbare Linienbreite besitzen.

## Längenmessung

Die Lage der Interferenzstreifen beim Michelson-Interfero-

ALLARD GRAPHIC ARTS



**Oben:** Pétrot-Fabry-Interferometer. Ein Teil des zwischen die unvollständig verspiegelten Platten eintretenden Lichtes wird reflektiert, ein Teil wird durchgelassen. Das resultierende parallele Lichtbündel wird durch eine Linse konvergent gemacht und ergibt durch konstruktive Interferenz einen hellen Ring auf dem Schirm. Aus anderen Richtungen einfallende Wellen interferieren destruktiv und führen zu dunkleren Zonen oder zu einem schwarzen Ring.

**Rechts:** Tragbares Landesystem für Militärflugzeuge und -hubschrauber. Es arbeitet mit Mikrowellen von 6 cm Länge, so daß die Interferometer relativ kompakt gebaut sein können. Die horizontale Einheit bestimmt die Richtung, die vertikale die Höhe.



MEL EQUIPMENT



**Links:** Ein Kösters-Zeiss Interferometer zum Messen von sehr genau gearbeiteten Metallteilen. Dabei wird eine Primärmessung mit Krypton-86-Lampen und eine Sekundärmessung mit Helium-Neon-Lasern durchgeführt.

**Unten:** Diese zwei Spiegel von jeweils 6,5 m Durchmesser werden benutzt, um das Licht eines hellen Sternes auf Lichtdetektoren zu fokussieren. Ein Rechner kombiniert die Signale und bestimmt den Winkeldurchmesser des Sternes.

meter reagiert empfindlich auf kleinste Verschiebungen der Spiegel, so daß man damit die Wege, die die Lichtbündel zurücklegen, sehr genau messen kann. Die Messung der Verschiebungen ist genauer als die Wellenlänge des benutzten Lichtes, also genauer als ein Millionstel Meter. Die Längenmessungen in dem berühmten Michelson-Morley-Experiment über die Existenz des Äthers als Trägersubstanz der Felderscheinungen (1889) wurden später von Einstein zur Unterstützung seiner speziellen RELATIVITÄTSTHEORIE herangezogen.

Heute werden Interferometer, die auf den Michelsonschen Prinzipien beruhen, zu sehr genauen Längenmessungen benutzt. Das Meter als Standardlängenmaß ist heute nicht mehr als Länge einer Referenzstange definiert, sondern als eine feste Anzahl von Lichtwellenlängen, die mit einem Interferometer zu bestimmen ist. Mit Lasern ist es heute möglich, sehr kompakte und präzise Längenmeßgeräte zu bauen, die vor allem für Längenmessungen von weniger als einem Meter, zur Prüfung der Genauigkeit von Drehbankskalen oder direkt als Längenskalen in Präzisionsinstrumenten benutzt werden.

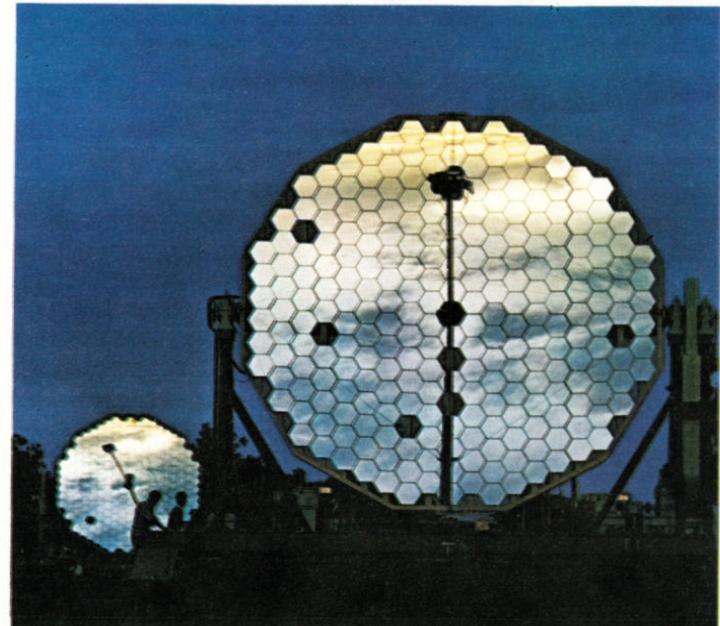
### Das Pérot-Fabry-Interferometer

Beim Interferometer nach Pérot und Fabry sind die beiden Spiegel parallel angeordnet, so daß das Licht mehrfach zwischen ihnen hin und her reflektiert werden kann. Nur ein sehr begrenztes Band von Wellenlängen übersteht die Interferenzen bei so zahlreichen Reflexionen ohne größeren Intensitätsverlust. Kommerziell sind Pérot-Fabry-Interferometer als Interferenzfilter erhältlich und werden für verschiedene Wellenlängenbereiche hergestellt, etwa um sichtbares Licht einer Projektionslampe durchzulassen und infrarote Strahlung zu blockieren, die den zu projizierenden Film beschädigen könnte. Diese Hitzeschäden sind besonders bei solchen Projektoren zu vermeiden, in denen sehr starke Lampen für ein helles, großes Bild sorgen müssen, z.B. in Freilichtkinos.

### Radioastronomie

Einfache Interferometer der Radioastronomie bestehen aus zwei nach Süden ausgerichteten Antennen, die auf einer Ost-West-Grundlinie angeordnet sind. Beide dienen zur Aufnahme von Radiowellen desselben Objektes, z.B. eines Spiralnebels. Die auf beiden Seiten aufgenommenen Signale werden in denselben Empfänger gespeist. Mit der Drehung der Erde ergeben sich unterschiedliche Laufwege der Radiowellen zu den beiden Antennen. Die Interferenz zwischen den beiden aufgenommenen Wellen erzeugt starke und schwache Signale, ähnlich den hellen und dunklen Streifen im Michelson-Interferometer.

Wenn die Radiowellen nicht von einem Objekt, sondern von



zwei eng benachbarten Quellen herrühren, wie man es oft bei Quasaren (Abkürzung für Quasistellare Radioquelle), den am weitesten von der Erde entfernten Objekten, beobachtet, werden von jeder Quelle entsprechende Interferenzerscheinungen hervorgerufen. Eine kompliziertere Struktur führt auch zu einer komplizierteren Interferenzfigur, deren genaue Form auch von der gegenseitigen Entfernung der beiden Antennen abhängt.

In den großen modernen Radiointerferometern werden eine ganze Reihe von Antennen benutzt, von denen ein Satz ortsfest bleibt, während andere beweglich sind. So lassen sich viele verschiedene Interferenzzustände einstellen. Auf einer Rechenanlage läßt sich ein Bild des Aufbaues eines Spiralnebels oder eines Quasars konstruieren. Die Trennung der Antennen eines großen Interferometers der Universität Cambridge, Großbritannien, ist so kritisch, daß man die fünf Kilometer lange Schiene, auf der die acht Flächenantennen angeordnet sind, als gerade Linie ausgeführt hat; sie folgt also nicht der Erdkrümmung. Interkontinentale Interferometrie ist mit RADIOTELESKOPEN in Amerika und Europa mit Erfolg versucht worden, wobei eine Rechenanlage die Radiosignale der beiden Empfangsanlagen kombinierte, um die Interferenzen zu konstruieren. Es bestehen Pläne, mit interkontinentaler Radiointerferometrie die Entfernung zwischen zwei Radioteleskopen regelmäßig zu überprüfen, um so die Verschiebung der Kontinente, auf denen sie stehen, direkt zu beobachten.

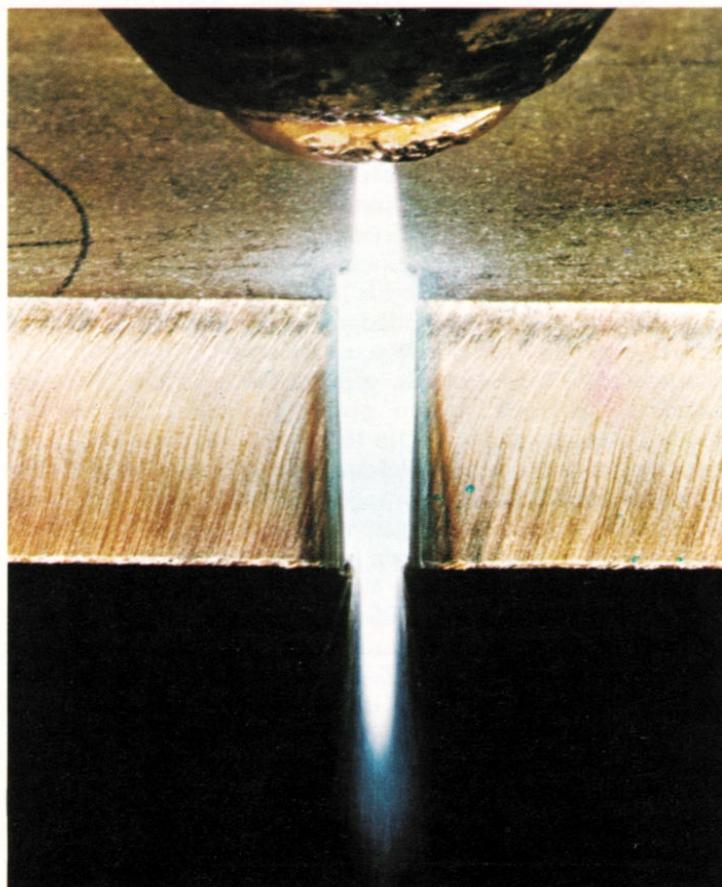
# IONEN UND IONISATION

**Die gesamte Materie ist aus Atomen aufgebaut. Häufig tragen diese Atome eine elektrische Ladung, womit sie zu Ionen werden. Ionen spielen eine wichtige Rolle in vielen Apparaten, vom Geigerzähler bis zum Wasserenthärter.**

Ein ATOM besteht aus dem zentralen Kern mit Neutronen und Protonen und aus der umgebenden 'Wolke' von Elektronen. Die Zahl der positiv geladenen Protonen ist gleich der Zahl der negativ geladenen Elektronen, so daß das Atom insgesamt elektrisch neutral ist. Nimmt man dem Atom jedoch ein Elektron oder mehrere Elektronen oder fügt man Elektronen hinzu, so ergibt sich ein elektrisch geladenes Atom, das man Ion nennt. Ein negatives Ion heißt Anion, ein positives heißt Kation. Ionen können statt aus einzelnen Atomen auch aus chemisch gebundenen Atomgruppen hervorgehen. In der chemischen Schreibweise werden Ionen entsprechend ihrer Ladung mit Plus- oder Minuszeichen versehen: Ein Pluszeichen bedeutet, daß dem Atom oder der Gruppe von Atomen ein Elektron fehlt, woraus eine positive Ladung resultiert, zwei Minuszeichen bedeuten zwei zusätzliche Elektronen, usw. Einige Beispiele für Ionen sind:  $H^+$  (Wasserstoffion) oder

**Rechts:** Veranschaulichung der Ionisation der in einem Volumen befindlichen Luftmoleküle durch Röntgenstrahlen. Die Moleküle werden angeregt und so gestört, daß einige Elektronen aus den äußeren Elektronenschalen herausgeschlagen werden und sich an andere Moleküle anheften können.

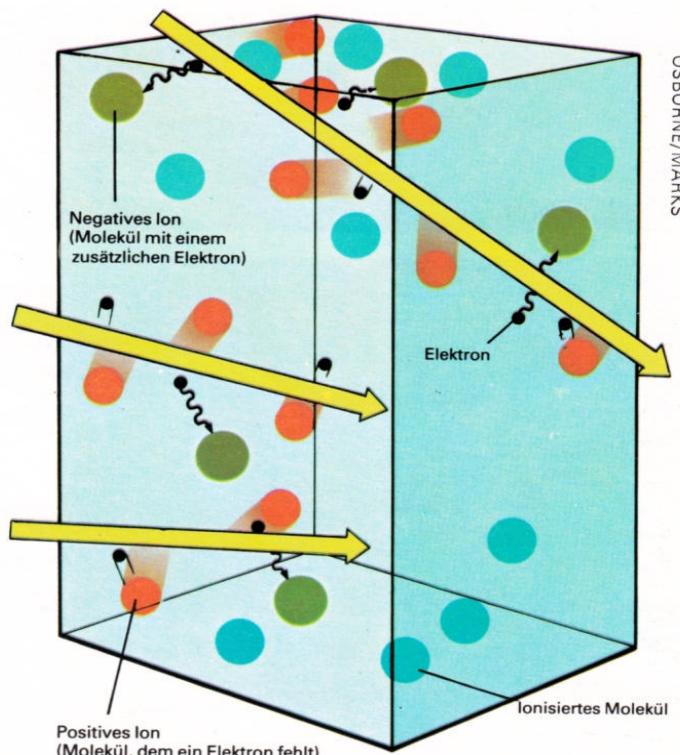
**Unten:** Eine Plasmaflamme durchschneidet Edelstahl. Argon und Wasserstoff werden in einem Hochfrequenzlichtbogen zwischen der Kupferdüse und der Wolfram-Elektrode ionisiert. Das Plasma wird elektronisch aufrechterhalten und erreicht  $3000^\circ C$ .



Proton),  $Ca^{2+}$  (Calciumion),  $NO_3^-$  (Nitration),  $Cl^-$  (Chlorion) und  $SO_4^{2-}$  (Sulfation).

## Elektronenschalen

Die Elektronen, die den Kern eines Atoms umgeben, sind in diskreten Energieniveaus oder 'Schalen' angeordnet, wobei jede Schale eine bestimmte Zahl von Elektronen aufnehmen kann. Ein solches System ist besonders stabil, wenn es keine teilweise gefüllten Schalen gibt. Hieraus erklärt sich, warum einige Elemente leicht Ionen bilden und andere nicht. Natrium hat beispielsweise zwei volle innere Elektronenschalen, aber nur ein einzelnes Elektron in der äußeren Schale, die bis zu acht Elektronen aufnehmen könnte. Deshalb gibt Natrium dieses eine Elektron leicht ab und wird zum Natriumion ( $Na^+$ ) mit zwei vollständig gefüllten, abgeschlossenen Elektronenschalen. In ähnlicher Weise nimmt das CHLOR, das sieben Elektronen in der äußeren Schale besitzt, leicht ein weiteres Elektron auf, um diese Schale voll zu besetzen, und bildet das

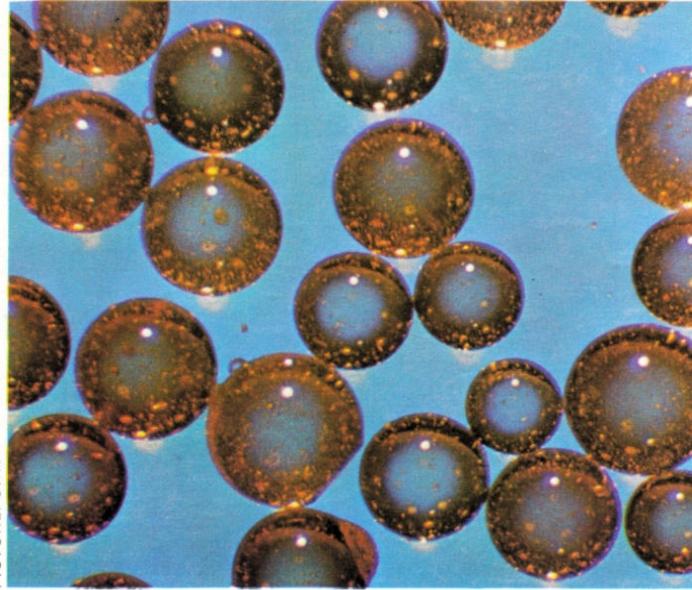


OSBORNE/MARKS

Chlorion ( $Cl^-$ ). Es ist deshalb nicht weiter überraschend, daß Natrium mit Chlor heftig reagiert und die relativ stabile Verbindung Natriumchlorid (Kochsalz) bildet.

## Bildung von Ionen

Ionen können auf vielerlei Art erzeugt werden, z.B. durch chemische Reaktionen, durch Erhitzen, durch Bestrahlung (beispielsweise mit RÖNTGEN- oder GAMMASTRÄHLEN) und durch Stöße. In einem Gas findet die Ionisation häufig mit Hilfe von Elektronen statt, die von einem geeigneten erhitzten Metall abgegeben werden und in einem elektrischen oder magnetischen Feld beschleunigt werden, bis sie auf die positive Elektrode (die Anode) treffen. Während ihrer Bewegung treffen die Elektronen auf Gasatome. Je schneller die Elektronen fliegen, desto größer ist ihre Fähigkeit, bei diesen Zusammenstößen (Kollisionen) weitere Elektronen aus den Atomen herauszuschlagen. Dadurch entstehen positive Ionen. Dieser Vorgang spielt sich z.B. in einer Entladungs- oder Glimmlampe (etwa der Natriumdampflampe) ab. Das abgegebene Licht entsteht bei der Wiedervereinigung (Rekombination) der Ionen mit den Elektronen des als 'Plasma' bezeichneten Gemisches.



PICTUREPOINT

### Die Bewegung der Ionen

In einem elektrischen Feld folgt ein Ion den elektrischen Feldlinien (wobei die Bewegungsrichtung von der Art der Ladung abhängt), während es die magnetischen Feldlinien kreis- oder spiralförmig umfährt.

Diese Bewegungen sind für die Wissenschaftler sehr nützlich. Es stellte sich beispielsweise heraus, daß man durch die Kombination eines elektrischen Feldes mit einem magnetischen Feld eine Mischung aus verschiedenen Ionen nach dem Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse trennen kann. Gelingt es also, eine Substanz mit einer unbekannten chemischen Zusammensetzung zu ionisieren, läßt sich das Massenspektrometer (siehe MASSENSPEKTROSKOPIE) benutzen, um die einzelnen chemischen Elemente zu identifizieren und ihre Mengenanteile zu bestimmen.

Die meisten Detektoren für geladene Teilchen beruhen auf der Erscheinung der Ionisation. Das einfachste Gerät ist die Ionisationskammer — ein gasgefüllter Behälter mit zwei Elektroden, zwischen denen eine Spannung angelegt wird.

**Oben:** Nordlicht (hier über Manitoba, Kanada) wird durch Ionisierung der Atmosphäre erzeugt.

**Links:** Organischer Ionenaustauscher (hochpolymere Kunstharzkugeln) zur Wasserenthärtung.

Wenn ein geladenes Teilchen auf seinem Weg Ionen erzeugt, fließt ein kleiner Strom, der mit einer geeigneten elektrischen Schaltung nachgewiesen werden kann. Der Geigerzähler arbeitet nach demselben Prinzip, nur mit einer höheren Spannung.

### Ionen in Lösung

Das bisher Besprochene scheint mit dem täglichen Leben wenig zu tun zu haben. Tatsächlich aber sind ionische Substanzen sehr verbreitet. Natriumchlorid, gewöhnliches Kochsalz, ist ein ionischer Festkörper, der positive Natrium- und negative Chlorionen in einem kubischen Gitter (siehe KRISTALL) enthält, so daß beide Ionensorten in gleicher Zahl vorkommen und die Gesamtladung gleich Null ist. Erst wenn sie aufgeschmolzen oder in Wasser gelöst werden, erkennt man deutlich, daß Ionenkristalle verschieden geladene Teilchen enthalten. In beiden Fällen wird der reguläre Aufbau des festen Zustandes zerstört. Die Ionen werden beweglich. Legt man zwischen zwei Metallelektroden, die in eine ionische Schmelze oder Lösung hineinragen, eine elektrische Spannung an, so bewegen sich die negativen Ionen zur positiven Elektrode und die positiven Ionen zur negativen Elektrode. Auf dieser Grundlage beruht das Verfahren der Elektrolyse.

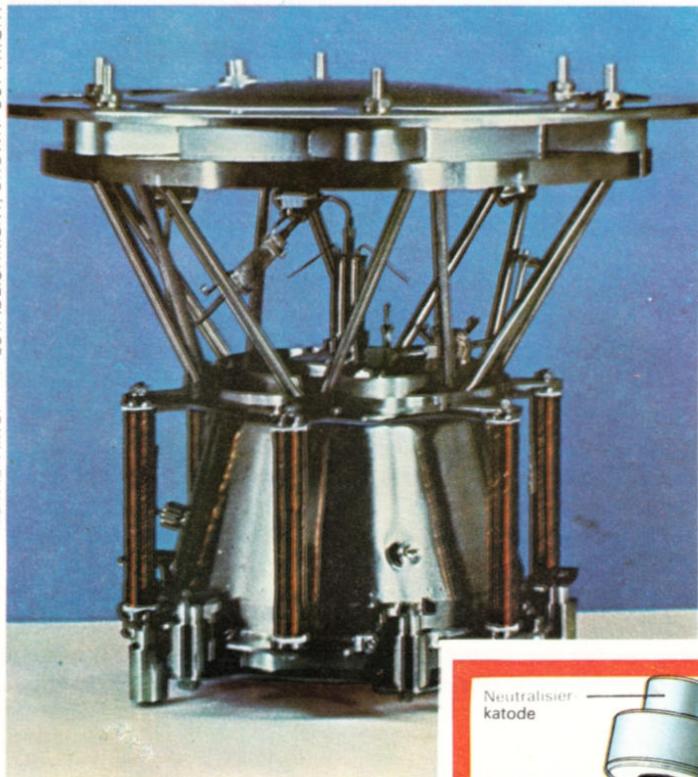
Ionen können auch mit Hilfe von Chemikalien, wie organischen Kunstharzen oder natürlichen Silikatmineralien des Calciums oder Aluminiums (Zeolithe), bewegt und umdirigiert werden. Diese Substanzen erlauben in der Lösung den Austausch einer Ionensorte gegen eine andere. Im Falle zu harten Wassers können sie das unerwünschte Calcium durch Natriumionen ersetzen, die zur Härte nicht beitragen. Ionenaustausch läßt sich auch zur Trennung von Isotopen benutzen, ebenso zur Meerwasserentsalzung oder zur chemischen Extraktion von URAN.

# IONENANTRIEB

Raketen der Zukunft werden möglicherweise elektrisch geladene Atome (Ionen) zum Antrieb im Weltraum benutzen.

RAKETEN werden angetrieben, indem ein Materialstrom in eine vorgegebene Richtung gelenkt wird. Das Newtonsche Prinzip 'actio = reactio' sagt aus, daß zu jeder Krafteinwirkung eine entsprechende Gegenkraft vorhanden ist. Diese Gegenkraft, die in entgegengesetzter Richtung des Materialstromes wirkt, treibt die Rakete an. Theoretisch kann jedes, mit einer gewissen Geschwindigkeit ausgestoßene Material den sogenannten Rückstoßeffekt bei Raketen bewirken. Selbst

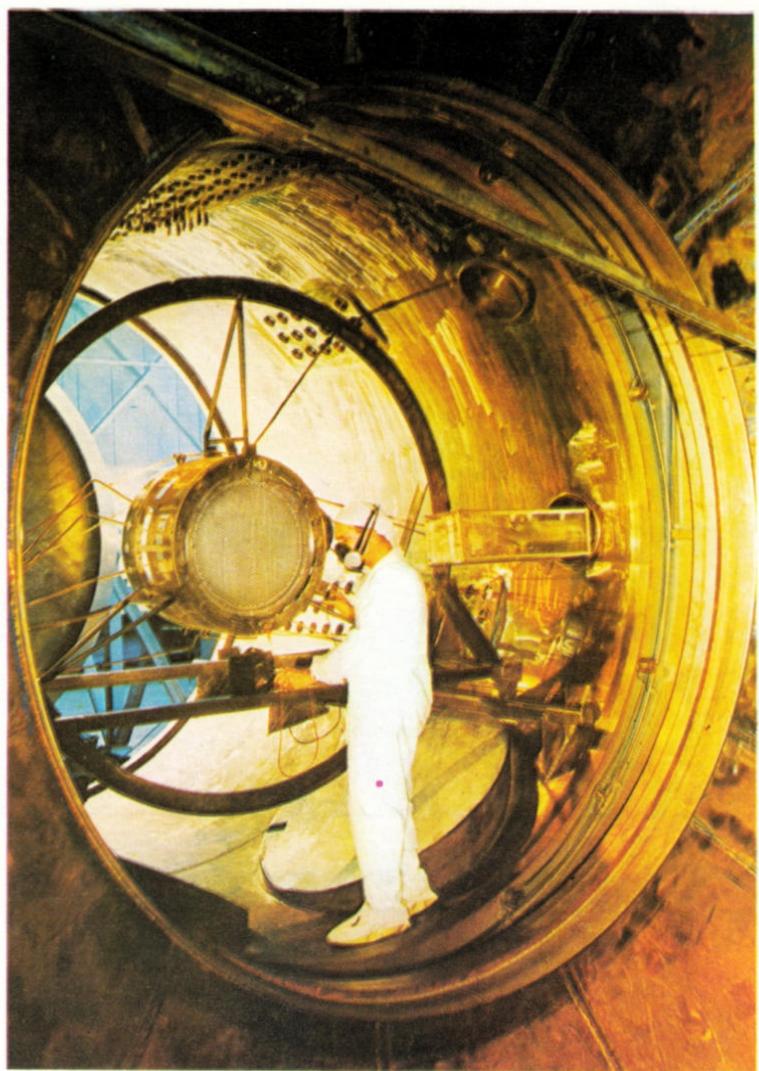
ROYAL AIRCRAFT ESTABLISHMENT/CROWN COPYRIGHT



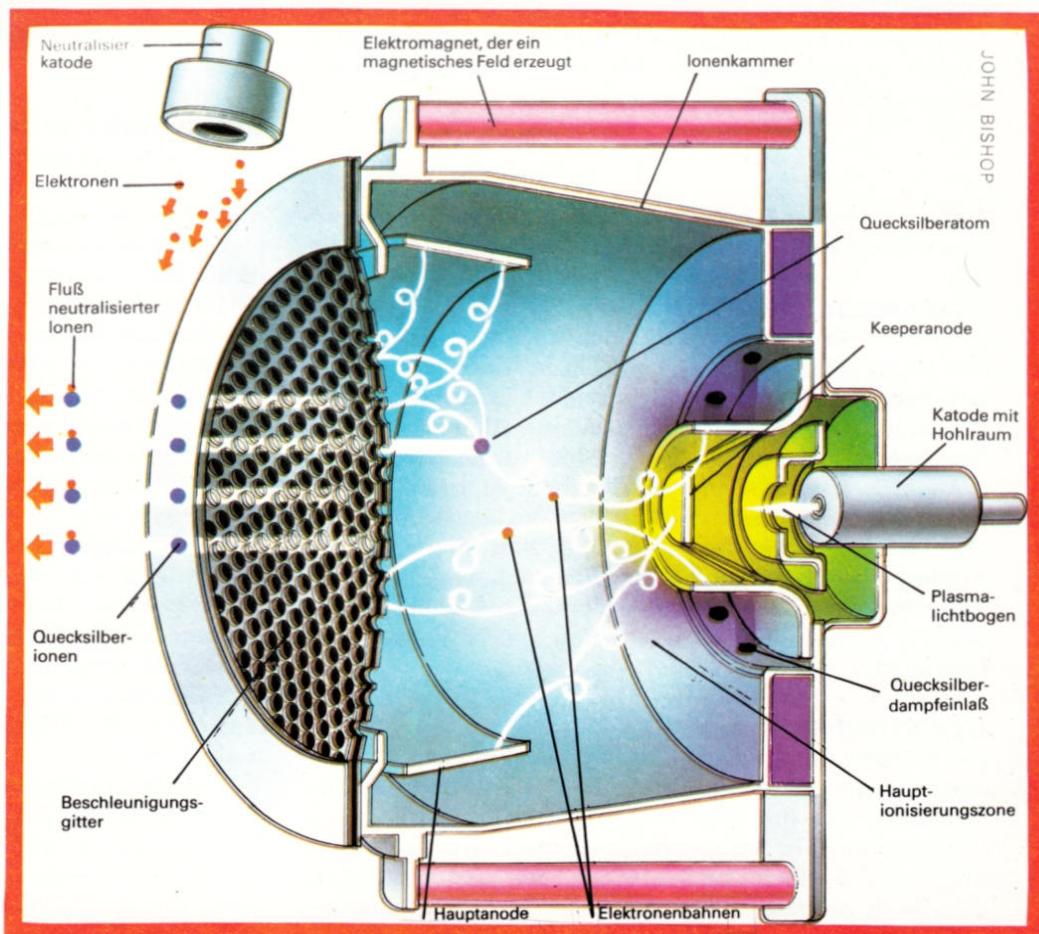
**Oben:** Ein T-4-Ionenantrieb, der entwickelt wurde, um in zukünftigen europäischen Fernmeldesatelliten eingesetzt zu werden. Er ist wegen des Durchmessers des Gitters unter dem Namen 10-cm-Triebwerk bekannt.

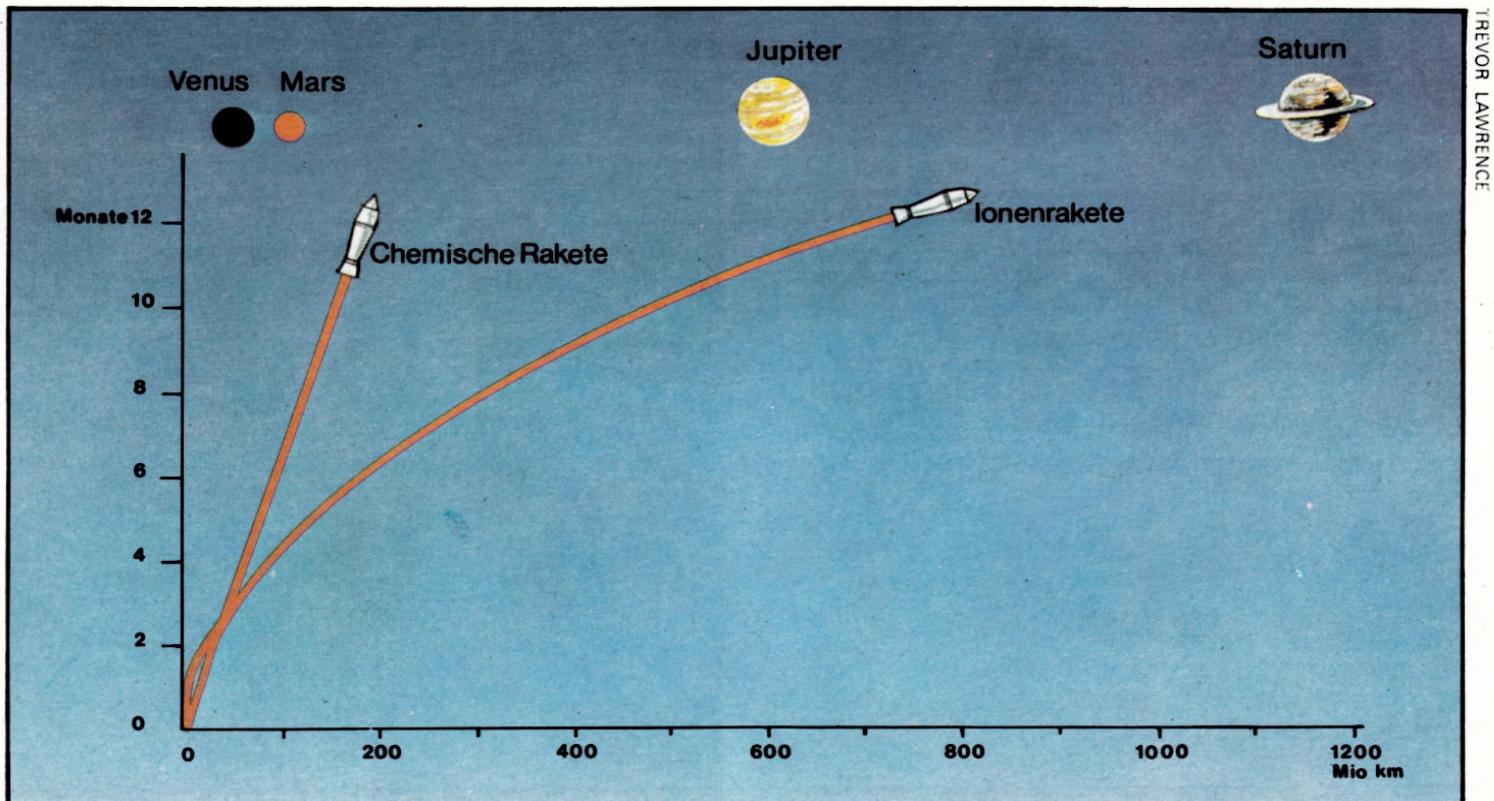
**Oben rechts:** Ein Ionenantrieb (Durchmesser: 50 cm) in einer Vakuum-Testkammer. Das Experiment wird durchgeführt, um die optimalen Abmessungen eines Ionenantriebs festzustellen.

**Rechts:** Eine Querschnittszeichnung des Inneren eines T-4-Ionenantriebs. Der Lichtbogen zwischen der hohlen Katode und dem Keeper startet den Ionisierungsprozeß. Die Hauptionisierung findet allerdings im Zentrum der Ionenkammer statt. Diese Art von Ionenantrieb hat eine Ausströmungsgeschwindigkeit von 30 km/s (= Schubkraft 10 mN).



JOHN BISHOP





Ein Vergleich zwischen den Entfernungen, die in einer bestimmten Zeit von einer chemischen und einer Ionenrakete zurückgelegt werden können. Die chemische Rakete verliert in sehr kurzer Zeit ihre Antriebskraft und bewegt sich danach mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Die Ionenrakete ist zuerst langsamer, setzt aber ihre Beschleunigungsaktionen ständig fort, so daß sie die chemische Rakete nach etwa drei Monaten überholen kann. Aus diesem Grunde ist der Einsatz einer Ionenrakete bei interstellaren Missionen im Weltall sinnvoller. Sie könnte bei längeren Reisezeiten bei weitem die größte Entfernung zurücklegen. Nur für kürzere Missionen wäre der elektrostatische Raketenantrieb vorzuziehen.

Steine, die aus der Rückseite des Raumschiffes geworfen werden, verleihen ihm einen Antrieb in Gegenrichtung.

### Chemische Raketen

Konventionelle chemische Raketen arbeiten so, daß ein Brennstoff bei Anwesenheit von Sauerstoff in der Triebwerkskammer verbrennt. Hierdurch entsteht ein heißes Gas mit einem hohen Druck, das durch eine Düse austritt. Alternativ ist der Ionenantrieb denkbar, bei dem ein Ionenstrom erzeugt wird.

Aus vielerlei Gründen ist der chemische Antrieb derzeit die einzige Art des Antriebes. Nur er kann die ungeheure Schubkraft erzeugen, die ein Raumschiff zum Start benötigt. Befindet sich das Raumschiff im Weltraum, ist die beispielsweise für eine Bahnkorrektur notwendige Schubkraft deutlich geringer. Im Weltraum sind andere Faktoren von Bedeutung.

### Spezifischer Impuls

Ein wichtiges Maß für die Leistungsfähigkeit eines Raketenmotors ist der spezifische Impuls. Hierunter versteht man die Schubkraft des pro Masseneinheit austretenden Gases. Je höher der Wert für den spezifischen Impuls ist, um so weniger Masse pro Sekunde wird benötigt, um eine vorgegebene Schubkraft zu erzielen. Der spezifische Impuls ist allerdings nicht die einzige wichtige Größe, um einen Raketenmotor für

eine spezielle Anwendung auszuwählen. Wichtig sind auch die Größe der Schubkraft und das Gewicht der Zusatzeinrichtungen (Verkleidung, Tanks, Instrumente, Rohrsysteme und Räume).

Der spezifische Impuls einer Ionenrakete ist etwa zehnmal höher als der von chemischen Raketen, d.h. die Brennstoffmenge für eine vorgegebene Schubkraft ist etwa zehnmal leichter. Triebwerke mit Ionenantrieb sind besonders dort geeignet, wo eine kleine Schubkraft über längere Zeit benötigt wird, da die beim Ionenantrieb erreichbare Schubkraft klein ist.

### Ionentriebwerke

Durch Ionen angetriebene Triebwerke verwenden im allgemeinen als Treibstoff Cäsium oder QUECKSILBER. Das Quecksilber wird verdampft, indem man es durch ein aufgeheiztes, poröses Material schickt. Der elektrisch neutrale Quecksilberdampf wird nun ionisiert, indem er durch eine enge Röhre, die als Katode dient, geleitet wird. Durch einen Lichtbogen, der zwischen der Katode und der Anode (auch Keeper genannt) entsteht, werden positive Quecksilberionen und Elektronen erzeugt. Anschließend wird in die Ionenkammer weiterer Quecksilberdampf geleitet, der durch Zusammenstoß mit den freien Elektronen ionisiert wird. Angezogen werden die freien Elektronen von der Anode. Durch ein zusätzlich einwirkendes Magnetfeld wird der Weg der Elektronen in Richtung der Anode verlängert, wodurch mehr Zusammenstöße mit den Quecksilberatomen stattfinden können.

Die positiven Ionen werden in Richtung eines negativ geladenen Gitters beschleunigt. Beim Austritt der Ionen aus dem Gitter wird ein Triebstrahl erzeugt. Zur Verhinderung der elektrostatischen Aufladung der Ionenrakete werden hinter dem Beschleuniger wieder Elektronen in den Ionenstrahl geleitet.

Es werden derzeit Ionenantriebe dieser Art entwickelt, um beispielsweise bei Fernmeldesatelliten, die in den achtziger Jahren gestartet werden, Kurskorrekturen vornehmen zu können. Die von den Ionenantrieben erzeugte Schubkraft ist durch die große Masse der Triebwerke (im Vergleich zu chemischen Triebwerken) begrenzt.

# ISOLATOR, ELEKTRISCHER

Isolatoren werden zur elektrischen Trennung strom-führender Leiter benötigt. Allerdings ist auch der hochwertigste Isolator nicht vollkommen und lässt noch einen geringen Stromfluß zu.

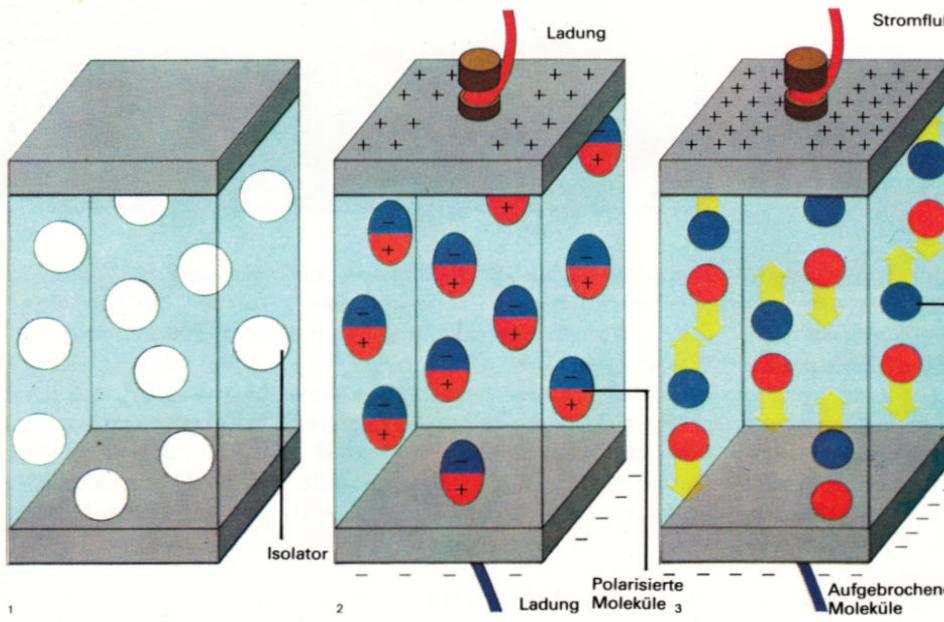
Keramische Materialien wie Porzellan werden zur Isolierung von Freileitungen an Hochspannungsmasten eingesetzt. Zur Isolierung elektrischer Leitungen verwendet man flexible Kunststoffe, wie z.B. Polytetrafluoräthylen.

## Spezifischer Widerstand

Ebenso wie es kein Material gibt, das den elektrischen Strom unendlich gut leitet, ist auch ein vollkommener Isolator mit unendlich großem WIDERSTAND eine Idealvorstellung. Der elektrische Widerstand kann als Maß für den Widerstand angesehen werden, das den Ladungsträgern während ihrer Bewegung durch das Material entgegentritt; charakteristisch für Isolatoren ist deren hoher Widerstand. Die Einheit für den elektrischen Widerstand ist das Ohm. Es gibt den Wert der Spannung an, die erforderlich ist, um einen Strom von einem Ampere durch das Material fließen zu lassen. Der elektrische Widerstand ist nicht nur eine materialabhängige, elektrische Eigenschaft, sondern er wird auch von der Baugröße und der Form des Materials bestimmt. Die Angabe des Widerstandes, die sich lediglich auf Materialeigenschaften bezieht, heißt spezifischer Widerstand. Damit lässt sich beispielsweise ein Kupferwürfel mit 1 cm Kantenlänge mit einem Quarzglaswürfel der gleichen Größe vergleichen. Legt man an beide Würfel die gleiche Spannung an, beträgt der Stromfluß durch den Glaswürfel  $1/10^{24}$  des Stromes, der durch den Kupferwürfel fließt. Aus diesem Verhältnis sind die ausgezeichneten Isolationseigenschaften des Quarzglases zu erkennen. Deshalb füllt man elektrische Sicherungen mit Quarzpulver. Schmilzt wegen eines übermäßig großen Stromes der Draht innerhalb der Sicherung durch, bildet der Metalldampf mit dem Pulver ein isolierendes Medium.

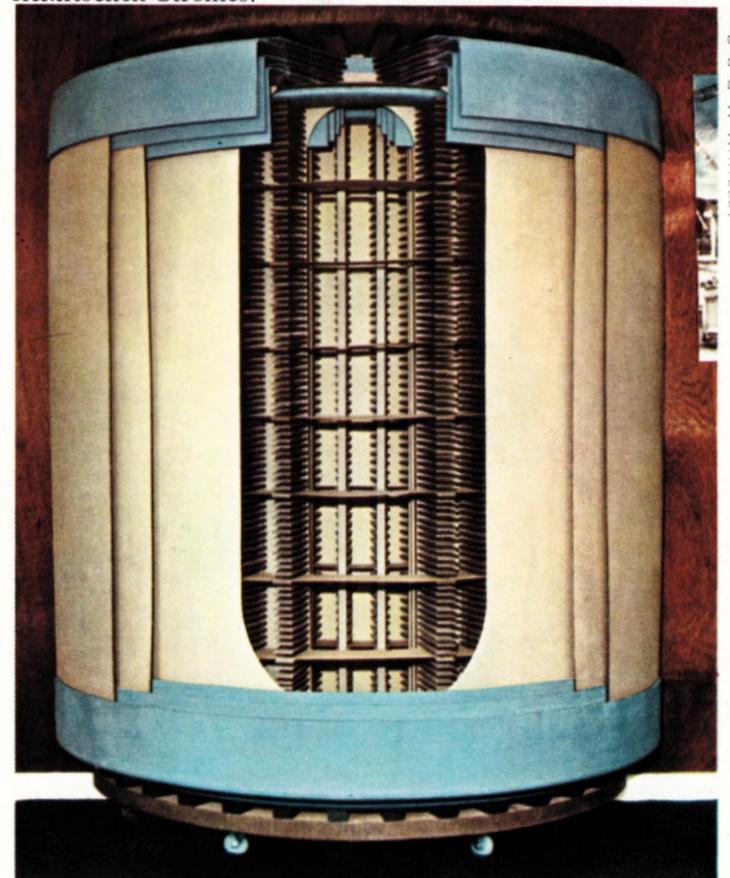
## Aufbau von Isolatoren

Isolatoren besitzen wegen ihres atomaren und molekularen Aufbaus einen hohen elektrischen Widerstand. Ihre Elektronen sind innerhalb eines Moleküls fest gebunden. Im Gegensatz dazu können sich im Leitermaterial Elektronen frei bewegen, so daß unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes ein Stromfluß möglich wird.



## Durchschlagsspannung

Isolatoren können Strom leiten, der jedoch bei Zimmertemperatur und den üblicherweise angewandten Spannungen außerordentlich gering bleibt. Wird ein Isolator sehr hohen Spannungen ausgesetzt, kann es zum Aufreißen der Bindungsstruktur kommen. Es entsteht ein leitfähiger Kanal, in dem der elektrische Strom schnell zunimmt. Dieser Vorgang wird als Durchschlag bezeichnet. Die genaue Größe der Spannung, bei der diese Wirkung auftritt, hängt von der Art der Bindungsstruktur ab, die im Isolator vorliegt. Wird die kritische Spannung eines Isolators überschritten, werden Elektronen aus den Bindungen herausgerissen. Durch das Angebot an freien Elektronen, die sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes bewegen können, wird der Widerstand des Isolators erheblich herabgesetzt. Die Folge ist das Fließen eines elektrischen Stromes.



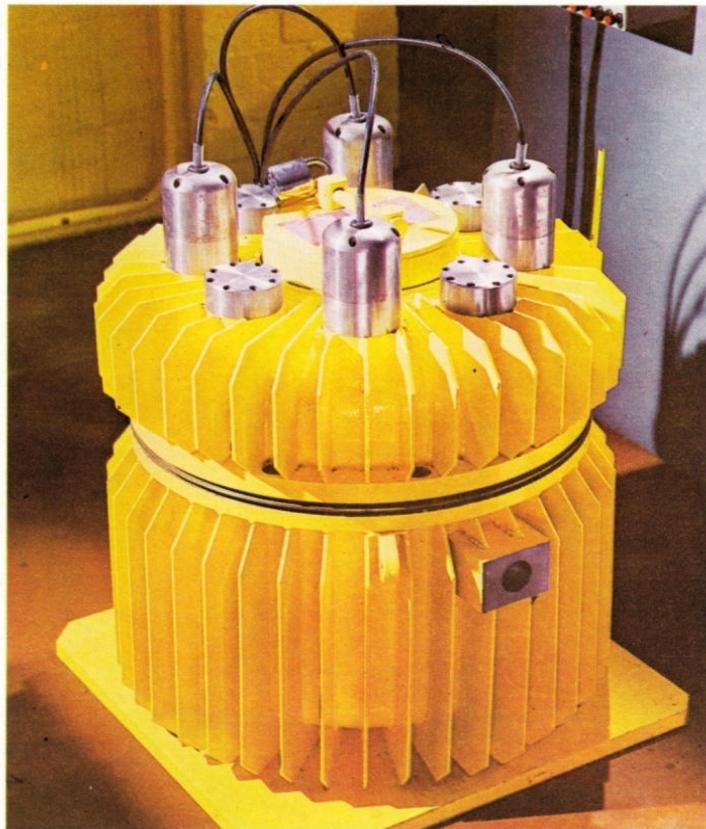
**Oben:** Schnittbild einer Transformatorspule ohne Kupferwicklung. Man sieht die Isolation, die hier aus Zellulose besteht. Auf dieser Abbildung ist die Zellulose aus Holzbrei hergestellt; heute setzt man häufig auch Baumwollstreifen zur Produktion der Zellulose ein.

**Links:** Isoliermaterialien bestehen aus positiven und negativen Ionenpaaren und wirken daher neutral. Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes richten sich die Ionenpaare aus. Sie sind polarisiert. Große Feldstärken brechen die Bindungen auf. Es fließt dann ein Strom.

## ISOTOPE

**Die verschiedenen Isotope eines Elementes sind chemisch gleich, unterscheiden sich jedoch in ihren physikalischen Eigenschaften. Sind die Isotope radioaktiv, haben sie einen unschätzbaran Wert für Forschung und Industrie.**

Jedes ATOM eines chemischen Elementes besteht aus einem Atomkern mit Protonen und Neutronen, der von Atomschalen umgeben ist, auf dem Elektronen umlaufen. Ein Atom ist für die Außenwelt neutral, da die Anzahl der Protonen (positiv geladene Teilchen) und die Anzahl der Elektronen (negativ geladene Teilchen) gleich sind. Die chemischen Elemente



**Oben:** Ein elektrischer Generator zum Betreiben eines Leuchtfuers. Die Stromquelle ist das Radioisotop Strontium-90.

**Rechts:** Eine chemische Verbindung, deren Moleküle Atome von Radio-Isotopen enthalten, wird in das Blut eines Seidenspinners injiziert. Mit dieser Methode kann der Wissenschaftler untersuchen, in welcher Form die Verbindung aufgebrochen oder verändert wird.

unterscheiden sich in ihren Eigenschaften durch die Anzahl der im Atomkern enthaltenen Protonen. WASSERSTOFF beispielsweise enthält ein Proton, Helium zwei Protonen usw. Die Atome desselben Elementes können im Atomkern eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen enthalten; man spricht dann von den Isotopen eines Elementes. Von KOHLENSTOFF kennt man drei Isotope. Er enthält 6 Elektronen und 6 Protonen, die den Kohlenstoffcharakter bestimmen. Im Kohlenstoffkern können 6, 7 oder 8 Neutronen vorkommen. Diese drei Kohlenstoffisotope nennt man Kohlenstoff-12 (<sup>12</sup>C), Kohlenstoff-13 (<sup>13</sup>C) und Kohlenstoff-14 (<sup>14</sup>C). Die Zahlen geben die Summe der im Atomkern enthaltenen Protonen und Neutronen an.

## Trennung von Isotopen

Obwohl die verschiedenen Isotope gleiche chemische Eigenschaften haben, unterscheiden sie sich doch in ihren Massen. Durch den Massenunterschied können die einzelnen Isotope in einem natürlichen Gemisch voneinander getrennt werden. Ein kleiner Teil (0,015%) der Wasserstoffatome des WASSERS sind Atome des Wasserstoffisotops Deuterium (D), das doppelt so schwer wie das übliche Wasserstoffatom ist. Wird Wasser einer ELEKTROLYSE unterzogen, wandern die Wasserstoff- (Deuterium-) Ionen zur Katode und werden hier als Wasserstoff- (Deuterium-) Gas freigesetzt. Da die Deuteriumionen schwerer als die Wasserstoffionen sind, wandern sie langsamer zur Katode als die Wasserstoffionen. Mit Fortschreiten der Elektrolyse steigt in der Flüssigkeit die Kon-



zentration an schwerem Wasser ( $D_2O$ ). Hat sich das Wasser in der elektrolytischen Zelle auf etwa 1/100 000 der ursprünglichen Menge verringert, liegt praktisch reines, schweres Wasser vor. Das Uranisotop <sup>235</sup>U — es wird in Kernreaktoren und der Atombombe verwendet — wird von dem häufiger vorkommenden Uranisotop <sup>238</sup>U abgetrennt, indem man gasförmiges Uranhexafluorid ( $UF_6$ ) durch ein inertes, poröses Material diffundieren lässt. Die <sup>238</sup>U enthaltenden Moleküle diffundieren langsamer als die leichteren Isotope <sup>235</sup>U.

## Wissenschaftliche Anwendungen

Zu Beginn unseres Jahrhunderts wurde das natürlich vor-



**Oben:** Radioisotope werden zur medizinischen Diagnose verwendet. Dem Patienten wird eine kleine Menge radioaktiver Isotope injiziert. Anschließend wird das Gehirn mit einem Detektor (wie hier im Bild) abgetastet.

scheiden. Gibt man aber dem ausgestreuten Futter eine geringe Menge radioaktiven Phosphors ( $^{32}\text{P}$ ) bei, können die einzelnen Tiere des Schwarmes erkannt und ihr Verhalten untersucht werden.

Ein anderes Beispiel ist die  $^{14}\text{C}$ -Methode, mit der archäologische Funde datiert werden. Gebeine oder aus Holz gefertigte Produkte können bis zu einem Alter von 35 000 Jahren bestimmt werden (siehe auch GEOPHYSIK).

### Industrielle Anwendung

In der Industrie ist es wichtig, daß die Menge der gelagerten Edelmetalle oder gefährlichen Stoffe sehr genau bekannt ist. Quecksilber beispielsweise zählt sowohl zu den edlen Metallen als auch zu den Giftstoffen. Es wird in großen Mengen bei der Elektrolyse verwendet. Dem Elektrolyten wird eine geringe, aber genau bemessene Menge eines kurzlebigen Quecksilberradioisotops beigegeben. Nach gründlicher Mischung wird eine Probe gewogen und ihr radioaktiver Gehalt genau gemessen. Aus dem Zerfall des radioaktiven Quecksilbers kann auf die im System vorhandene Quecksilbermenge geschlossen werden.

Bei der Entwicklung neuer Legierungen ist es wichtig zu wissen, wieweit sich eine Teilkomponente in der kristallinen Struktur des Metalls angelagert hat. Ist die Teilkomponente radioaktiv oder wird sie durch Neutronenbeschuß radioaktiv gemacht, kann ihre Anlagerung im Kristall dadurch erkannt werden, daß man die polierte Metalloberfläche gegen einen fotografischen Film hält. Beim Entwickeln des Filmes sind die radioaktiven Teilkomponenten als schwarze Stellen zu erkennen. Diese Methode ist als Autoradiographie bekannt. Sie kann auch herangezogen werden, um die Aufnahme und genaue Verteilung von Nährstoffen in tierischem und pflanzlichem Gewebe festzustellen.

kommende, radioaktive Element Radium zur Erzeugung von Leuchtfarben und -zeichen verwendet. In neuerer Zeit werden aus Sicherheitsgründen künstlich erzeugte radioaktive Isotope wie Tritium ( $^3\text{H}$ ) statt Radium eingesetzt. Die Energie des radioaktiven Isotops (Radioisotop) Strontium-90 wird indirekt dazu benutzt, die Elektrizität zur Stromversorgung alleinstehender Leuchttürme zu erzeugen. Plutonium-238 wird in den langlebigen Batterien, die in HERZSCHRITTMACHERN eingesetzt werden, benutzt.

Die radioaktive Leitisopentechnik (Tracertechnik) wird in vielen wissenschaftlichen Forschungsbereichen angewendet. Insekten einer Art sehen alle gleich aus, und ein Insektenschwarm ist von einem anderen nicht zu unter-

# K

## KAFFEE

Die stimulierende Wirkung der Frucht des Kaffeebaumes wurde ursprünglich im dritten Jahrhundert in Abessinien entdeckt. Die Sage berichtet, daß ein Schäfer bemerkte, wie seine Herde lebhafter wurde, nachdem sie diese Früchte gefressen hatte. Heute ist Kaffee das populärste Getränk der Welt und wird von einem Drittel der Weltbevölkerung getrunken.

Die Kaffeepflanze ist eine immergrüne Pflanze, die eine natürliche Höhe von etwa 6 m erreichen kann. Bei kommerziellem Anbau wird sie auf eine Höhe von 2 m bis 3 m beschnitten, damit der Strauch kräftiger und das Ernten leichter wird.

Die Pflanze gedeiht in einem warmen, trockenen Klima in Höhen von 500 m bis 2000 m; sie stammt aus Abessinien und den arabischen Ländern. Heute wird Kaffee zwischen den Wendekreisen Krebs und Steinbock erfolgreich angebaut. Zu den hauptsächlichen Anbauländern gehören Brasilien, Kolumbien, die Elfenbeinküste, Kenia und Indien.

Die reife Frucht ähnelt einer Kirsche und enthält ein gelbes Fruchtfleisch, das zwei ovale Kerne oder Bohnen umgibt. Die Bohnen, die so nebeneinander liegen, daß jeweils die gerillten, abgeflachten Seiten zusammen sind, werden von einer feinen silbrigen Haut und von einer stärkeren Außenhaut, die als Pergament bekannt ist, umhüllt. Nach dem Ernten werden die



RICHARD HARRINGTON



**Oben:** Die Kaffeepflanze stammt ursprünglich aus Abessinien. Auch heute noch wird in Afrika viel Kaffee angebaut. Dieses Foto wurde im Sudan aufgenommen und zeigt das Harken von Kaffeebohnen. Auf diese Weise soll eine gleichmäßige und dauernde Trocknung herbeigeführt werden. Der Vorgang kann zwei bis drei Wochen dauern.

**Links:** Ein Mädchen im Süden Brasiliens bei der Kaffeernte. Sie kann mehr als 50 kg Kaffeebeeren an einem Tag pflücken. Brasilien ist einer der Hauptproduzenten von Kaffee in der Welt.

Bohnen entweder in einem Naß- oder in einem Trockenverfahren haltbar gemacht.

### Haltbarmachen der Bohnen

Bei der Trockenmethode, die im allgemeinen in Ländern bevorzugt wird, in denen Wasser knapp ist, werden die Bohnen entweder mit künstlichen Mitteln getrocknet oder sie werden auf dem Boden verteilt, um sie in der Sonne trocknen zu lassen. Häufiges Harken ist erforderlich, um ein gleichmäßiges Trocknen der Bohnen zu gewährleisten. Anschließend verwendet man eine Schälmaschine, um Pergament und Fruchtfleisch zu entfernen.

Wenn die Bohnen im Naßverfahren haltbar gemacht werden, wird erst das gelbe Fruchtfleisch maschinell entfernt, dann werden die Bohnen, die sich noch in ihrem Schutzpergament befinden, bis zu 72 Stunden lang in Wasser eingeweicht, um jeglichen noch übriggebliebenen Fruchtfleischzucker fermentativ zu entfernen. Nach Ablassen des Wassers werden

die Bohnen gründlich gewaschen, bis die Pergamenthaut ganz sauber ist. Die Bohnen werden getrocknet, und die restliche Haut wird in einer Reibmühle entfernt. Nach beiden Verfahren erhält man Bohnen, die im allgemeinen 'grüner' Kaffee genannt werden.

Wenn das Verfahren des Haltbarmachens beendet ist, wird der Kaffee geprüft, sortiert und auf den Märkten in der ganzen Welt zum Kauf angeboten. Vorräte an grünem Kaffee können entweder direkt im Ursprungsland oder vom Lagerbestand eines Kaffee-Großhändlers gekauft werden. Da der Geschmack der Bohne je nach Typ, Wachstumsbedingungen, der Trockenmethode und anderer Faktoren variiert, brauchen Kaffeekäufer ein großes Spezialwissen, um die richtigen Bohnen für ihre Standardmischungen auszuwählen.

## Rösten

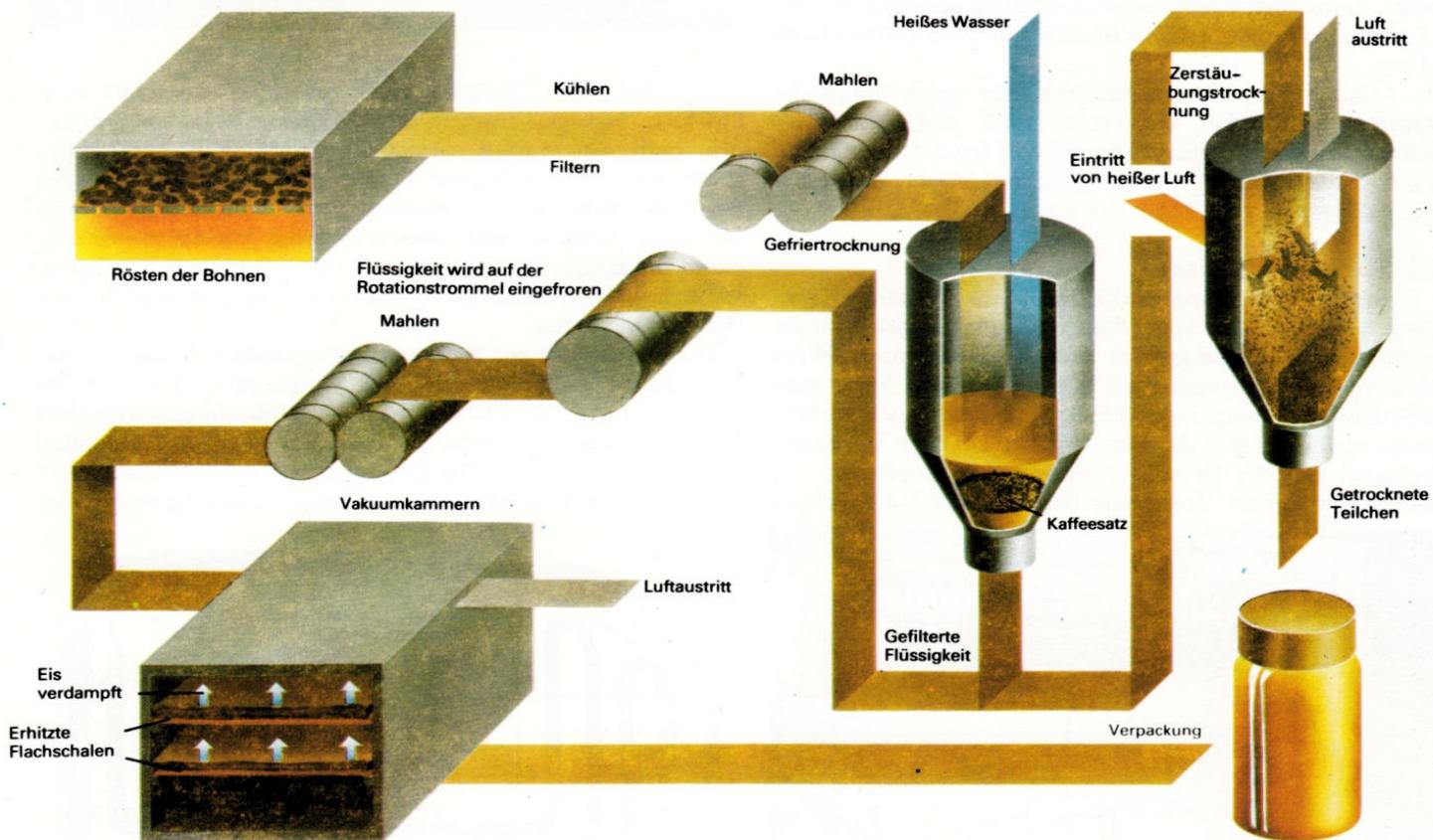
Nach dem Vermischen werden die Bohnen geröstet, ein Verfahren, das eine genaue zeitliche Bemessung erfordert, um zu gewährleisten, daß die porösen Zellen ihren Geschmack und

können in löslichen Kaffee umgewandelt werden, der im allgemeinen Instant-Kaffee genannt wird. Die ausgewählte Bohnenmischung wird geröstet und gemahlen; anschließend wird in der Extraktionsanlage heißes Wasser durch den gemahlenen Kaffee gepumpt. Wenn die erforderliche Stärke erreicht ist, wird der Extrakt durch eine Reinigungs- und Kühlalage gepumpt, während der Kaffeerückstand ausgestoßen wird.

Beim Zerstäubungstrocknen wird die Kaffeeflüssigkeit fein zerstäubt in eine Kammer eingespritzt, durch die heiße Luft geblasen wird. Das Wasser in den Tröpfchen verdampft und trockene Kaffeeteilchen bleiben übrig. In dem neueren Agglomerationsverfahren wird das Produkt in diesem Stadium teilweise erneut befeuchtet, um das Pulver zu größeren Körnchen zu binden.

## Beschleunigte Gefriertrocknung

Gefriertrocknen ist das teuerste Verfahren zur Herstellung von löslichem Kaffee. Mit diesem Verfahren wird jedoch ein intensiverer Kaffeegeschmack beibehalten.



ihr Aroma während des Zubereitungsstadiums leichter abgeben. Das Rösten geschieht in Rotationstrommeln, die gewöhnlich mit Gas erhitzt werden, ohne jedoch mit der Wärmequelle in direkten Kontakt zu kommen. Die Bohnen werden dann in eine große, kreisrunde, perforierte Metallschale gegeben, wo sie durch rotierende Metallarme gerührt werden. Ein schnelles Abkühlen trägt dazu bei, das Aroma des Kaffees durch Verschließen der Bohnenporen zu erhalten.

Bevor die Bohnen zu einem Getränk zubereitet werden können, müssen sie gemahlen werden, um somit den vollen Geschmack herauszuholen. Dies kann der Verbraucher tun, aber es wird oft schon vom Hersteller durchgeführt, der das Fertigprodukt dann vakuumdicht in Gläser oder Büchsen verpackt, um die Frische zu bewahren und den Geschmack zu garantieren.

## Instant-Kaffee

Sowohl gewöhnlicher Kaffee als auch koffeinfreier Kaffee

**Oben:** Instant-Kaffee-Herstellung. Nach dem Rösten und Granulieren wird heißes Wasser durch den gemahlenen Kaffee gepumpt, bis die Flüssigkeit eine bestimmte Stärke erreicht hat. Das Pulver kann dann gewonnen werden.

Nach der Extraktion wird die Kaffeeflüssigkeit mit Gas geschäumt, um die richtige Schütteldichte in dem Fertigprodukt zu erzeugen. Sie wird dann auf einem Band oder einer Trommel in Form eines Bandes eingefroren. Noch in gefrorenem Zustand wird sie zerbrochen, gemahlen und in die gewünschte Teilchengröße gesiebt. Das Ganze wird auf flache Schalen gegeben, die in eine Vakuumkammer gebracht und dort auf Heizplatten gesenkt werden. Die Kombination von angewandter Wärme und Vakuumbedingungen bewirkt, daß der Kaffee trocknet, ohne in den flüssigen Zustand zurückzukehren. Nach dem Trocknen wird das Produkt wieder den normalen Bedingungen von Druck und Temperatur zugeführt.

## KÄLTETECHNIK

Die heutigen Haushaltstühlgeräte (Kühlschränke, Tiefkühltruhen und -schränke) gehen auf die Aggregate der großen Kühlsschiffe zurück, die im vorigen Jahrhundert Fleisch aus Amerika, Australien und Neuseeland nach Europa brachten.

Um 1870 beförderten Schiffe auf  $-1^{\circ}\text{C}$  bis  $-2^{\circ}\text{C}$  gekühltes Fleisch in isolierten Laderäumen, die durch mit Salz versetztem Eis kühl gehalten wurden. Dieses Verfahren war allerdings nur bei dem vergleichsweise kurzen Transportweg von den Vereinigten Staaten von Amerika nach Europa anwendbar. Das erste, mit einer mechanisch arbeitenden Kühlanlage ausgerüstete Schiff war die 'Frigorifique', die im Jahre 1877 eine Versuchsüberquerung von Buenos Aires nach Rouen (an der Seinemündung in Frankreich) unternahm. Der Versuch war nicht sehr erfolgreich, denn das Fleisch verdarb unterwegs. Doch im selben Jahr brachte das Schiff 'Paraguay', das mit einer Ammoniak-Kompressoreinrichtung ausgestattet war, eine Ladung gefrorenes Hammelfleisch von Buenos Aires nach Le Havre.

Die Kühlanlagen entwickelten sich sehr rasch durch die Einführung verlässlicher ELEKTROMOTOREN und durch die öffentliche Stromversorgung. Die ersten Haushaltstühlgeräte kamen nach dem Ersten Weltkrieg auf den Markt; die ersten Tiefkühlanlagen folgten Mitte der 30er Jahre.

### Funktionsprinzipien

Das Prinzip der Kühlung beruht auf dem Verhalten einer geeigneten Flüssigkeit, vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand und umgekehrt übergehen zu können. Wird ein Gas verdichtet, steigt seine Temperatur an. Setzt man anschließend die Temperatur herab, ohne den Druck zu vermindern, verflüssigt sich das Gas. Wird andererseits bei einem verflüssigten Gas der Druck vermindert, verdampft es.

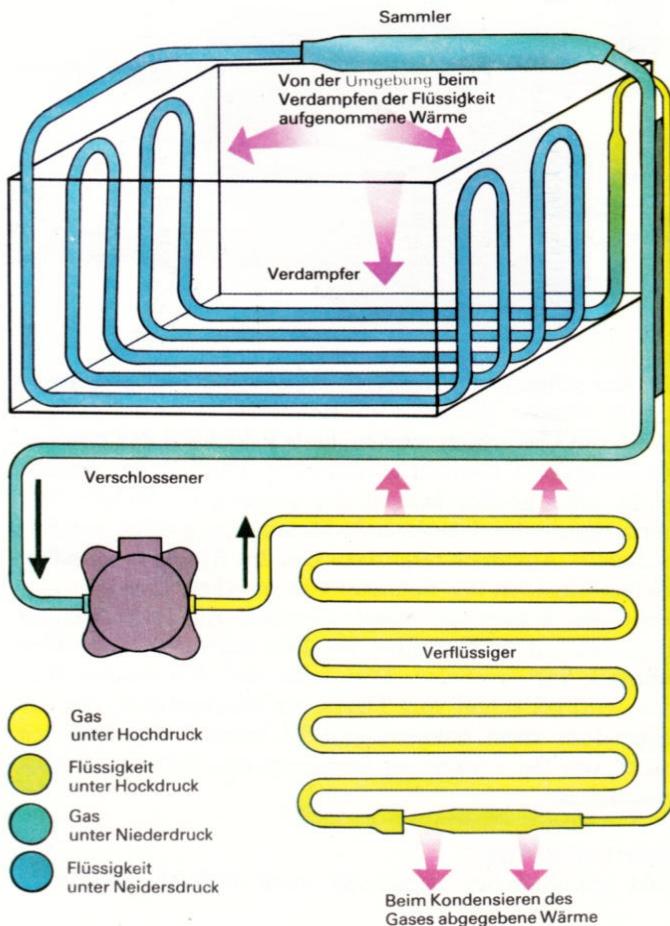
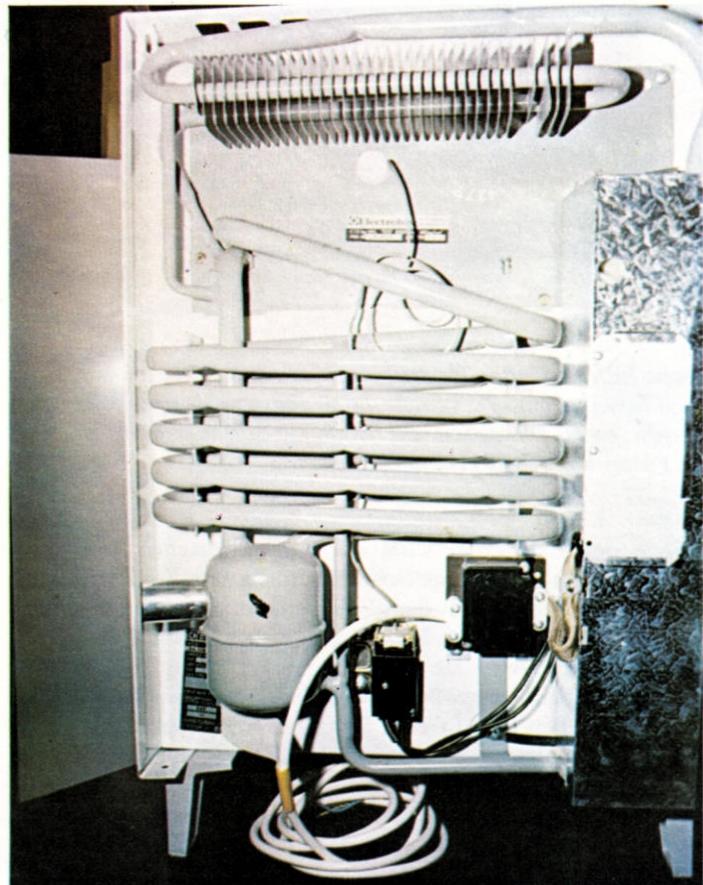
Der Nutzen dieses Verhaltens liegt für die Kältetechnik



PHOTRI

darin, daß beim Übergang einer Flüssigkeit zwischen ihrer flüssigen und gasförmigen Phase latente WÄRME (Wärme menge, die einem Stoff bei der Umwandlung zu- oder abgeführt wird, ohne dabei die Temperatur zu ändern) zu- oder abgeführt wird. Beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand muß latente Wärme zugeführt werden, damit die nötige Energie für die Umwandlung zur Verfügung steht. Bei der Verflüssigung von Gas hingegen wird latente Wärme freigesetzt.

In einer Anlage zur Kälteerzeugung verdampft die Arbeitsflüssigkeit (das Kältemittel) im Verdampfer, der sich im Kühlabteil befindet. Dabei wird die Umwandlungswärme dem Kühlabteil entzogen; seine Temperatur sinkt. Das Kältemittel geht dann an einen Verflüssiger außerhalb des Kühlabteils, wo es sich durch Kondensieren verflüssigt. Dabei gibt es seine

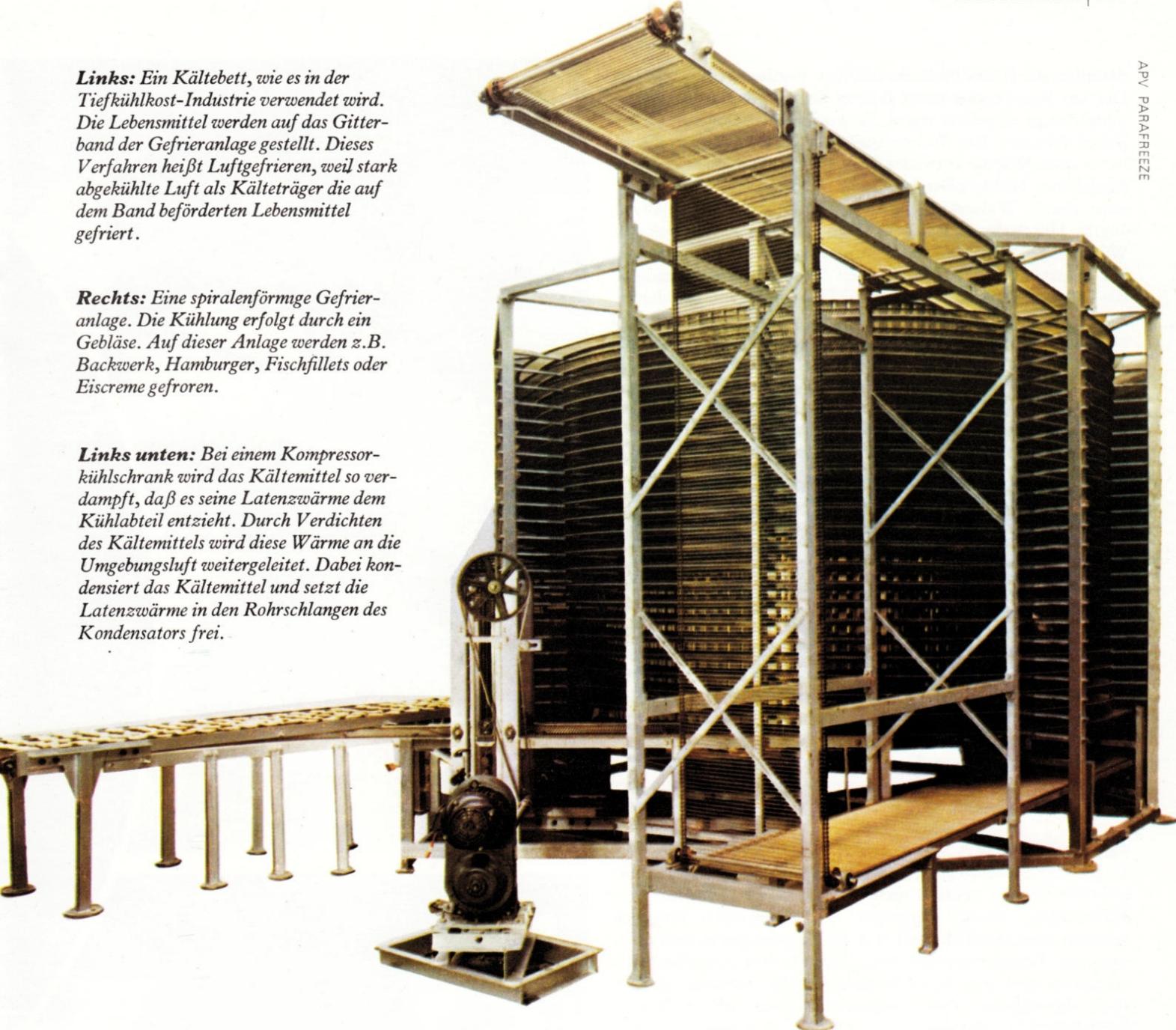


ALLARD GRAPHIC ARTS

**Links:** Ein Kältebett, wie es in der Tiefkühlkost-Industrie verwendet wird. Die Lebensmittel werden auf das Gitterband der Gefrieranlage gestellt. Dieses Verfahren heißt *Luftgefrieren*, weil stark abgekühlte Luft als Kälteträger die auf dem Band beförderten Lebensmittel gefriert.

**Rechts:** Eine spiralenförmige Gefrieranlage. Die Kühlung erfolgt durch ein Gebläse. Auf dieser Anlage werden z.B. Backwerk, Hamburger, Fischfillets oder Eiscreme gefroren.

**Links unten:** Bei einem Kompressor-kühlschrank wird das Kältemittel so verdampft, daß es seine Latenzwärme dem Kühlabteil entzieht. Durch Verdichten des Kältemittels wird diese Wärme an die Umgebungsluft weitergeleitet. Dabei kondensiert das Kältemittel und setzt die Latenzwärme in den Rohrschlangen des Kondensators frei.



im Kühlabteil aufgenommene Wärme ab. Bei der Wiederholung dieses Kreislaufes entzieht das Kältemittel dem Kühlabteil Wärme und gibt sie an die Umgebungsluft ab.

Die Temperatur wird in einem gekühlten Bereich durch einen Thermostaten geregelt, der die Umlaufgeschwindigkeit des Kältemittels und damit das Ausmaß der Kühlung steuert. Die beiden gegenwärtig zur Kühlung verwendeten Systeme arbeiten jeweils mit Absorbern und mit Kompressoren.

### Absorberkühlungen

Absorberanlagen arbeiten mit Ammoniak als Kältemittel. Ihre Arbeitsweise ist in der einfachsten Form folgendermaßen: Eine konzentrierte wäßrige Ammoniaklösung wird in einem meist elektrisch- oder gasbeheizten Kocher oder 'Austreiber' erwärmt. Da das Ammoniak flüchtiger als Wasser ist, verdampft Ammoniakgas, das sich im wassergekühlten Verflüssiger bei steigendem Druck unter Abgabe der Latenzwärme verflüssigt.

Das flüssige Ammoniak wird nun durch eine Drossel entspannt (Druckverminderung etwa 85%) und gelangt in den unter niedrigem Druck stehenden Verdampfer, der sich im Kühlbereich befindet. Beim Eintritt in den Verdampfer verdampft die Flüssigkeit, nimmt Wärme aus der Umgebung auf

und vermindert damit deren Temperatur. Die andere Seite der Verdampferleitung führt zum Absorber (außerhalb des Kühlabteils), der eine schwach wäßrige Ammoniaklösung enthält. Sie ist über den WÄRMETAUSCHER vom Austreiber dorthin gelangt. Die Lösung nimmt das Ammoniak auf, wodurch der Druck im Verdampfer herabgesetzt wird. Die auf diese Weise entstandene, mit Ammoniak angereicherte Lösung geht erneut durch den Wärmetauscher und entzieht dort der vom Austreiber kommenden schwächeren Lösung einen Teil der Wärme.

Dann fließt die angereicherte Lösung zurück zum Austreiber, wo sich der Kreislauf wiederholt. Der Kühlkreislauf wird, insbesondere bei gas- und ölbetriebenen Anlagen, durch die Schwerkraft oder Thermosiphonwirkung aufrechterhalten oder von einer kleinen Elektropumpe unterstützt.

### Kompressorkühlungen

Bei Kompressorkühlungen läuft das Kältemittel über einen Verdichter (KOMPRESSOR) um. Er kann durch einen Elektromotor über einen Keilriemen angetrieben werden oder aber auch (bei Kompaktanlagen) auf der Welle des Elektromotors laufen.

Die Niederdruckseite des Kompressors ist mit dem Ver-

dampfer, die Hochdruckseite mit dem Verflüssiger verbunden. Der am Kompressor unter hohem Druck austretende Kältemitteldampf ist relativ warm. Er wird unter Beibehaltung des hohen Druckes dem nachgeschalteten Verflüssiger zugeführt, wo er seine Wärme entweder über ein vom Kompressormotor getriebenes Kühlgebläse, das dem Verflüssiger Luft zuführt, oder durch Wasserkühlung des Verflüssigers nach außen abgibt. Durch das Zusammenwirken von erhöhtem Druck und Wärmeabgabe (d.h. Temperaturverminderung) wird das Kältemittel verflüssigt. Bei kleinen Anlagen kann es genügen, die Wärme über Kühlrippen an die Umgebungsluft abzuleiten. Durch ein Drosselventil wird das flüssige Kältemittel entspannt und gelangt wieder zum Verdampfer. Der vom Kompressor erzeugte Niederdruck saugt das Kältemittel durch den Verdampfer. Es verdampft und nimmt dabei Wärme aus dem Kühlbereich auf. Bei Haushalts-Kühlschränken liegen die Verdampfer-Rohrschlangen gewöhnlich im Eisfach. In diesem Fall verbreitet die Kühlwirkung sich im Kühlschrank durch sogenannte Konvektionsströme.

### Kältemittel

Es gibt eine Vielzahl von Kältemitteln, die zum Einsatz bei Kompressorkühllanlagen geeignet sind. Zu ihnen gehören Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ). Am nützlichsten allerdings ist die als 'Freone' bekannte Gruppe von halogenisierten Kohlenwasserstoffen. Die verschiedenen Freontypen werden durch Kennziffern unterschieden, aus denen sich auf die chemische Zusammensetzung schließen läßt: Freon-11 =  $\text{CCl}_3\text{F}$  (Trichlorfluormethan), Freon-12 =  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  (Dichlordifluormethan), Freon-113 =  $\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$  (Trichlortrifluoräthan) und Freon-114 =  $\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$  (Dichlortetrafluoräthan). Diese Gase haben nicht nur die für ein Kältemittel erforderlichen Eigenschaften, sie sind darüber hinaus korrosionsfrei.

### Anwendungen

Für Haushaltsgeräte, im Einzelhandel und im Gaststätten-gewerbe werden beide Typen (Kompressor- und Absorberkühllanlagen) häufig eingesetzt. Tiefkühllanlagen hingegen arbeiten ausschließlich nach dem leistungsfähigeren und wirksameren Kompressorverfahren. Vorteile des Absorberkühlschranks sind sein leiser Betrieb und die Tatsache, daß er ohne bewegliche Teile auskommt. Dem stehen höhere Betriebskosten entgegen; auch ist er im allgemeinen auf kleinere Geräte beschränkt.

Kühlhausanlagen brauchen Hunderte von Tonnen Kältemittel, da sie mit zahlreichen Kompressoren arbeiten. Gewöhnlich stehen ein oder zwei Reservekompressoren zur Verfügung, die bei Ausfall eines Aggregates eingesetzt werden können. Die Temperatur im Kühlbereich wird dadurch niedrig gehalten, daß Kühlschläuche vom Kältemittel durchflossen werden. Es kühlst über einen Wärmetauscher Sole ab, die dann in Leitungen durch das Lagerhaus fließt. Die Kühlung kann auch über eine Kaltluft-Umwälzung erfolgen, wie sie bei Klimaanlagen üblich ist.

Kunsteisbahnen werden auf niedrige Temperaturen gebracht, indem man das Kältemittel durch Kupferleitungen unter der Eisfläche leitet. Die erste Kunsteisbahn wurde im Jahre 1876 in London erbaut. Die Kälteerzeugung erfolgte mit einem Gemisch aus Wasser und Glyzerin, das durch Kupferleitungen geführt und durch verdampfenden Äther gekühlt wurde.

Zu den vielen weiteren Anwendungsgebieten der Kältetechnik gehören die Kühlfahrzeuge zum Transport von Lebensmitteln (Kühlwagen der Bahn, LKW mit Kühlkoffer), Küchenschiffe, Transport und Lagerung verflüssigter Gase, Anwendung in Industrie und Technik, sowie die Herstellung von Tiefkühlkost.



CAMERA PRESS



MAURITIUS



Verschiedene Anwendungsgebiete der Kältetechnik: Bei Operationen (oben links) wird der Patient in Eiswasser 'gekühlt', um seinen Stoffwechsel und Sauerstoffverbrauch herunterzusetzen. Kältetechnik im Sport: ein Eishockeyspiel auf künstlich gefrorener Fläche (unten links). Beim Militär und in der Raumfahrt: Ein Experiment mit einer Raketen-Abschüssebasis (oben rechts). Das Foto zeigt die Eismenge, die sich bei einer Temperatur von  $-7\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$  und starkem Wind angesammelt hat.

**Links:** Gefrorenes Bullensperma.

## KANÄLE

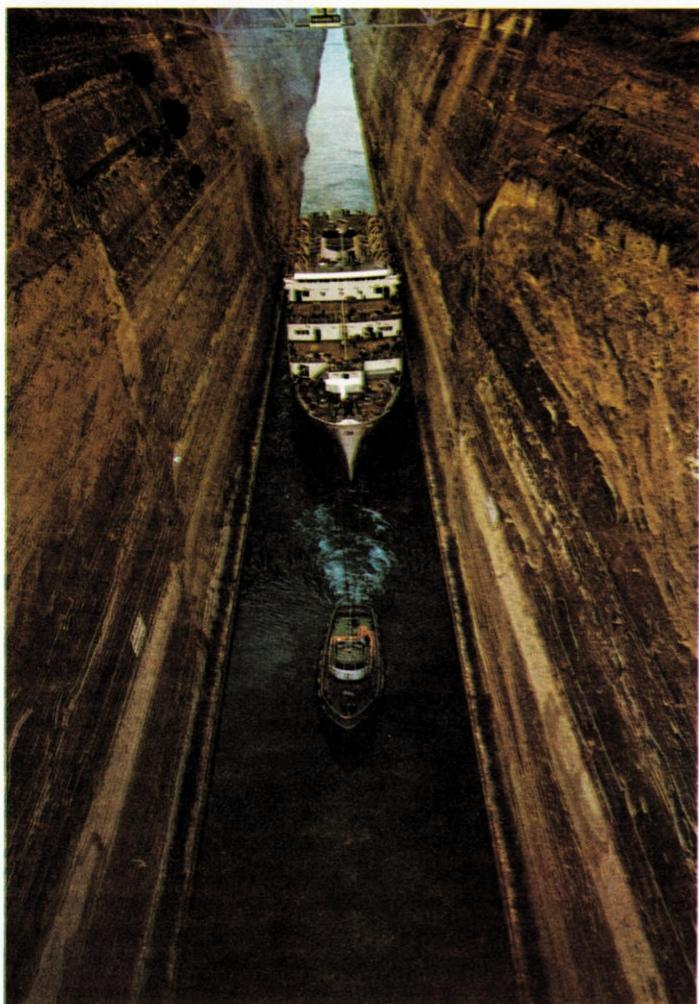
**Wasserstraßen zum Warentransport, die ganz und gar von Menschenhand geschaffen waren, gab es schon vor der Erfindung der Eisenbahn und vor dem modernen Straßenwesen. Noch heute ist der Kanal die preisgünstigste Möglichkeit, Massengüter zu befördern.**

Jeder von Menschen gebaute offene Wasserlauf ist — unabhängig von seinem Verwendungszweck (Wasserversorgung, Be- oder Entwässerung, Schiffahrt) — ein Kanal. Allerdings denken wir heute bei dem Wort 'Kanal' meist an Wasserstraßen, auch wenn einige von ihnen zusätzlich als Entwässerungs- oder Versorgungskanäle dienen.

Man darf Kanäle nicht mit schiffbaren Flüssen gleichsetzen, die entweder von Natur aus bis weit ins Binnenland befahrbar sind oder durch den Bau von Durchstichen zur Umgehung von Untiefen, scharfen Biegungen oder Stromschnellen sowie durch die Errichtung von Schleusen zur schiffbaren Wasserstraße gemacht wurden. Die Erfindung der Kammer-Schleuse war ein wichtiger Schritt auf dem Wege zum künstlichen Kanal. Er kann natürliche Wasserscheiden — dies sind Trennlinien zwischen zwei benachbarten Einzugsgebieten von Flüssen, meist die Kämme von Höhenzügen — überwinden und zwei Flussysteme miteinander verbinden.

### Kanalrouten

Schon lange bevor Kanäle allgemein verbreitet waren, verwendete man in der Flusschiffahrt Kammer-Schleusen. Der Grund dafür lag darin, daß der Bau von Kanälen, bei dem große Geländehöhenunterschiede zu überwinden waren, Hoch- und Tiefbauarbeiten in einem Umfang und von einer Art erforderte, für die weder die Mittel noch die Erfahrung zur

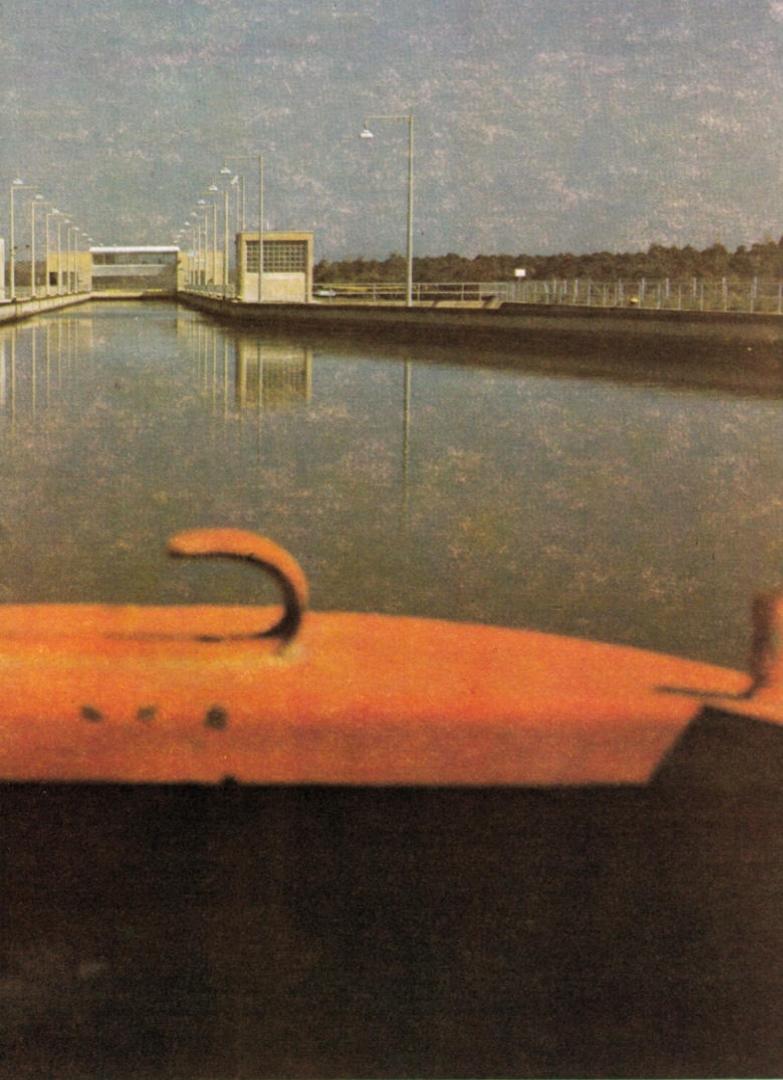


Verfügung standen. Viele frühe Kanäle folgten als 'Konturkanäle' auf verschlungenem Lauf der Gelände-Kontur, weil so die Kosten für aufwendige Erdarbeiten, Überquerungen oder Stollen vermieden werden konnten. Ganz konnte man solchen Arbeiten natürlich nicht aus dem Wege gehen. Es mußte ebenfalls dafür gesorgt werden, daß auch auf der Scheitelhöhe des Kanals genug Wasser zur Verfügung stand, damit die Wasserverluste bei den Schleusungen ausgeglichen wurden. Bei jeder Berg- oder Talfahrt eines Schiffes geht das Füllwasser der Schleusenkammer verloren, das aus dem anstegenden Wasser vom höhergelegenen Teil des Kanals stammt. Je größer das Schiff (und damit die Schleusenkammer) ist, desto größer ist der Wasserverlust. Besonders erschwert wird die Sache für den Kanalbauer dadurch, daß dieser Wasserbedarf gerade an der Stelle auftritt, wo er am schwierigsten zu decken ist, nämlich auf einer Hochfläche.

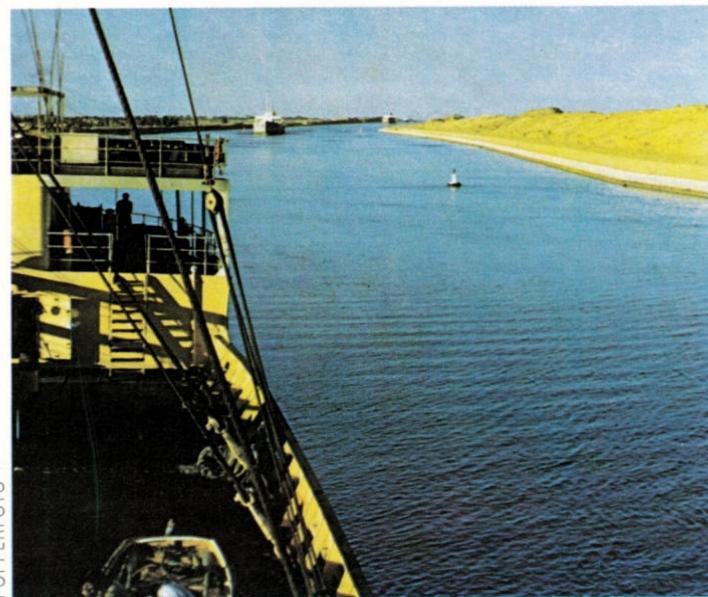
Der erste Kanal, der einen Höhenkamm überschritt, wurde in Frankreich gebaut. Dieser Kanal (Canal de Briare) verbindet die Loire mit der Seine. Er hat auf einer Länge von 56 km 40 Schleusen, mit denen ein Höhenzug von 81 m überwunden wird. Sein Erbauer war der brillante Ingenieur Hugues Cosnier. Vom Tage seiner Eröffnung im Jahre 1642 an hat dieser Kanal mit Gewinn gearbeitet. Er bereitete den Weg für ein ehrgeizigeres Projekt, den Canal du Midi, der von 1671 bis 1685 erbaut wurde und die Garonne bei Toulouse mit dem Mittelmeer verbindet. Seine Länge beträgt 241 km. Mit Hilfe seiner 65 SCHLEUSEN überwindet er einen Höhenunterschied von 189 m.

### Kanäle heute

In Europa und Nordamerika wurde bald eine Vielzahl von Kanälen erbaut, doch endete die große Zeit der Kanäle in England und Nordamerika mit dem Siegeszug der Eisenbahnen, der nach 1830 begann. Man ging mit einer gewissen Leichtfertigkeit davon aus, daß die Eisenbahn alle Trans-



**Oben:** Die Schleuse 'Hausen' unweit Erlangens, die zum Europa-kanal gehört. Der Kanal von Korinth (links) ist trotz seiner geringen Länge von 6,5 km für die Schiffahrt von großer Bedeutung. Er erspart die lange Reise um den Peloponnes. Der Kanal wurde Ende des vorigen Jahrhunderts gebaut und mußte durch Felsgestein (Mergelschichten) geschnitten werden. Er kann Schiffe bis zu 10 000 BRT aufnehmen. Der Gatunsee (rechts) liegt an der höchsten Stelle des Panamakanals 26 m über dem Meeresspiegel. Dieser künstliche See befindet sich in einem reichen Gebiet, so daß für die Schleusungen genug Wasser verfügbar ist. Der Suezkanal (im Bild unten) befindet sich auf Meereshöhe. Die Sandflächen wurden erst überschwemmt und dann ausgebaggert.



POPPERFOTO

portbedürfnisse erfüllen könne und ließ daher viele Kanäle einfach verfallen. Auf dem europäischen Festland lagen die Dinge anders: Hier entwickelten sich beide Transportsysteme nebeneinander, da man erkannt hatte, daß beide Transportsysteme bestimmte Bedürfnisse erfüllen. Der Hauptvorteil des Kanals lag darin, daß man auf ihm billige Massengüter über große Entfernungen befördern konnte, vorausgesetzt, er war für Schiffe von hinreichender Tonnage befahrbar. Daher wurden in diesen Ländern bestimmte Haupt-Kanalrouten im Laufe der Zeit sogar noch ausgebaut.

Als Beispiel hierfür kann der Rhein-Donau-Kanal gelten, dessen Bau im Jahre 1846 auf Betreiben des bayerischen Königs Ludwig I. in Angriff genommen wurde. Er sollte mit 100 Schleusen die Wasserscheide zwischen Rhein und Donau überqueren. Kähne von 130 BRT (Bruttoregistertonnen) konnten ihn befahren, und er war bis in die 40er Jahre dieses Jahrhunderts in Betrieb. Wegen des Mißverhältnisses von Arbeitsaufwand und Ertrag war der Kanal nach modernen Maßstäben nicht mehr konkurrenzfähig und wurde daher durch den Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtsweg abgelöst, den Europakähne (1350 BRT) auf der ganzen Länge befahren können. Neben der Kanalisierung von Main und Donau war dazu der Bau eines neuen Kanals, des Europakanals vom Main zur Donau, erforderlich. Der Großschiffahrtsweg ist gegenwärtig bis Nürnberg befahrbar, der südliche Abschnitt des Kanals und die Donaukanalisierung von Kelheim nach Regensburg sollen Mitte der 80er Jahre fertiggestellt sein.

Der einzige in Großbritannien noch bestehende große Kanal ist der 'Manchester Ship Canal', über den seegehende Schiffe

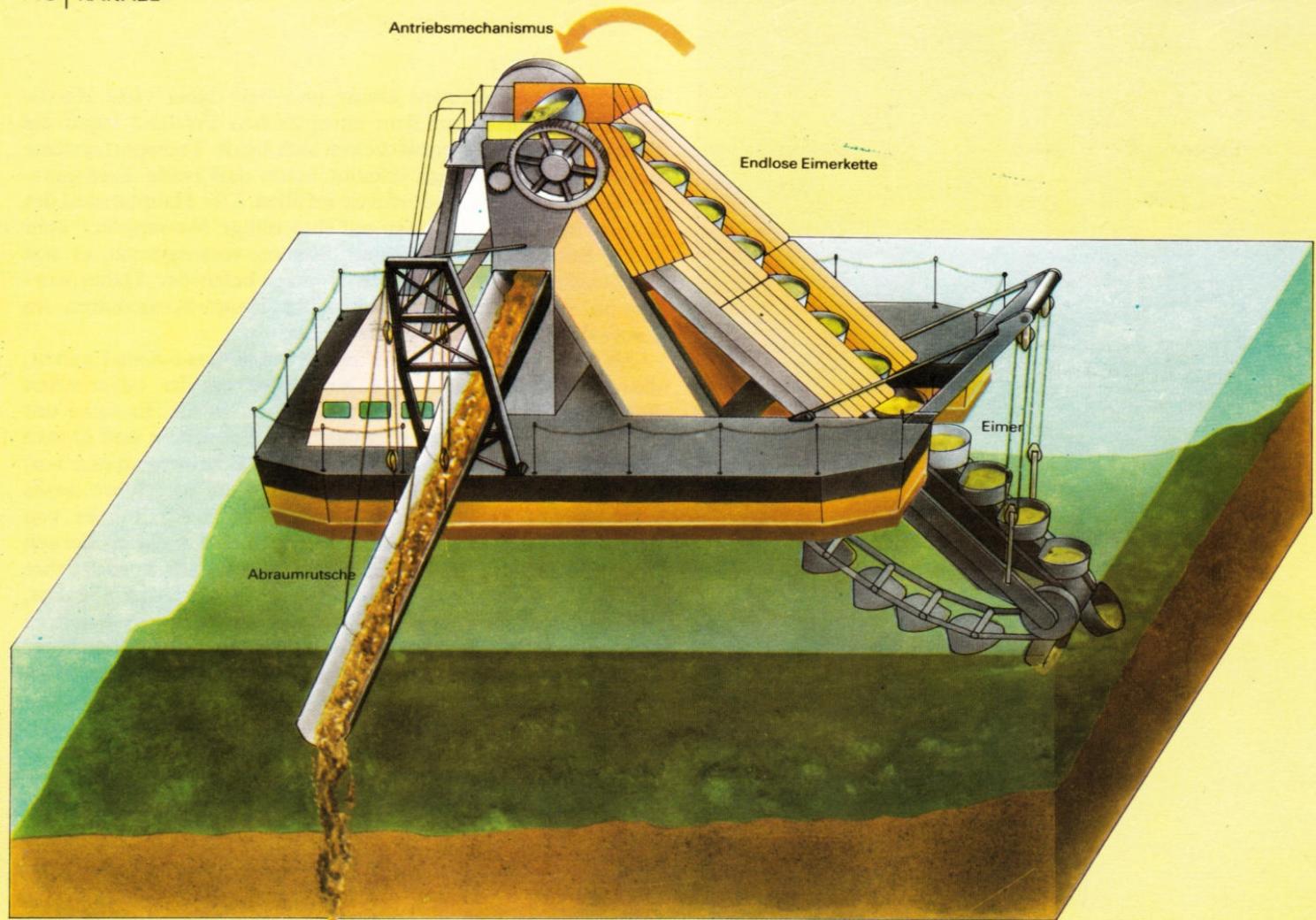


PICTUREPOINT

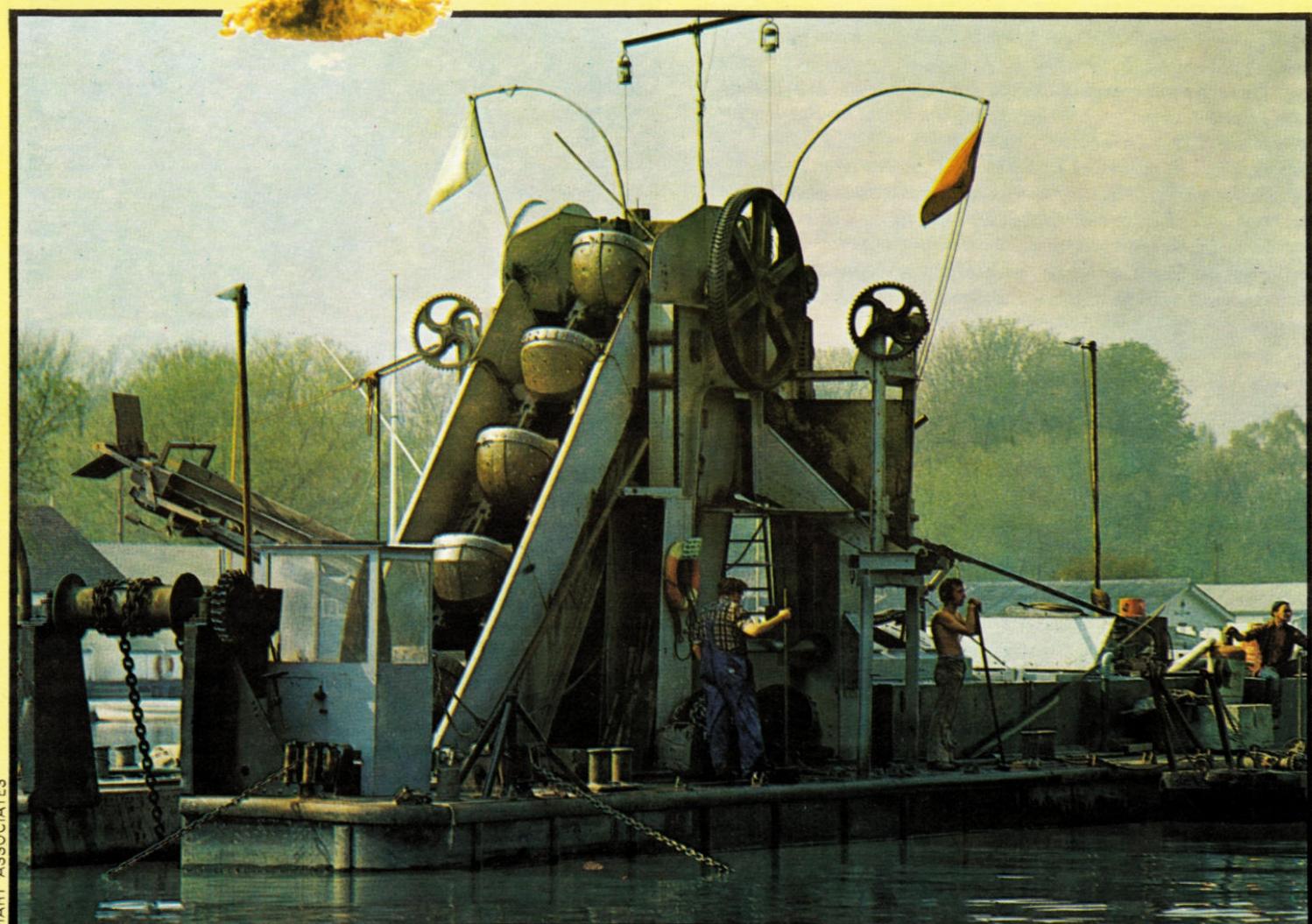
bis 4500 BRT den Hafen von Manchester erreichen können. In Nordamerika gab es eine äußerst erfolgreiche Binnengewässerstraße: Den berühmten Erie-Kanal, den von 1817 bis 1825 der Staat New York baute, um den Hudson mit dem Eriesee zu verbinden. Zur Zeit seiner Eröffnung war er mit 82 Schleusen auf einer Länge von 584 km der längste Kanal der Erde. Mit zunehmendem Verkehr wurde er auf ganzer Länge erweitert und vertieft. Im Jahre 1918 wurde er dann durch den 'State Barge Canal' in New York ersetzt, der Schiffe bis 2500 BRT aufnehmen kann.

### Schleusen

Einige moderne Schleusen sind von ungeheurer Größe. Die längste und breiteste befindet sich in Ijmuiden (Holland) im Verlaufe des Nordsee-Schiffahrtskanals. Sie hat eine Länge von 400 m und eine Breite von 50 m. Die Sowjetunion nimmt für sich den Ruhm in Anspruch, im schiffbaren Teil des



ALLARD GRAPHIC ARTS



HART ASSOCIATES



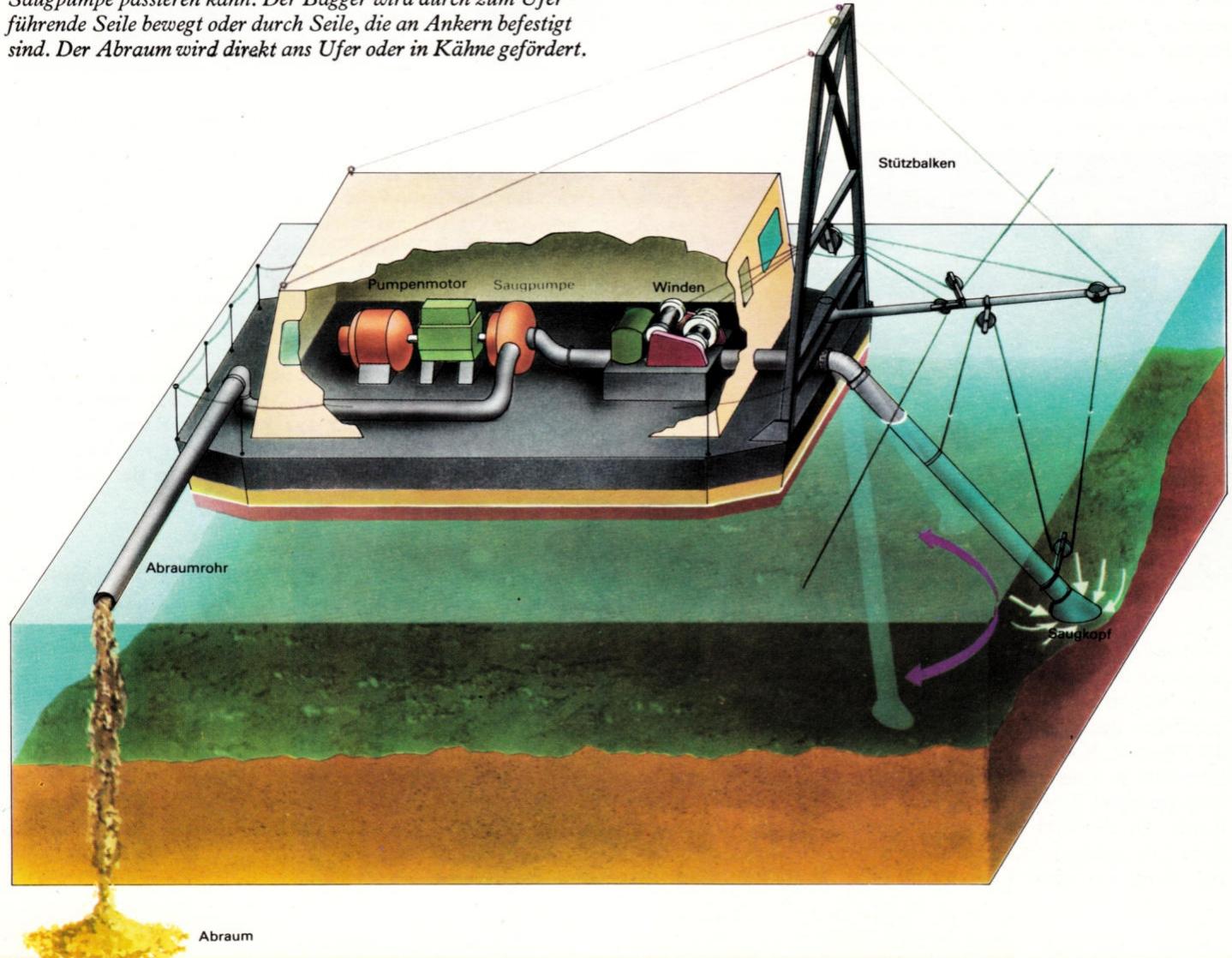
**Oben:** Ein Greifbagger bei der Arbeit. Im Prinzip handelt es sich um einen schwimmenden Kran, der von einem Dieselmotor angetrieben wird und dessen Greifer über Kabelzüge gesteuert werden. Er befindet sich auf einem motorlosen Kahn.

**Links:** Diagramm eines stationären Löffelbaggers (oben), das das Arbeitsprinzip einer solchen Anlage demonstriert. Darunter ein Löffelbagger, wie sie häufig auf Flüssen und Kanälen eingesetzt werden.

**Rechts:** Ein moderner Saugbagger beim Einsatz im Panama-kanal. Das Funktionsprinzip eines Saugbaggers ist in der Abbildung unten zu sehen. Diese Baggerart wird zum Abräumen von relativ losem Material eingesetzt, Sand und Steine, das jedoch eine bestimmte Größe nicht überschreiten darf, damit es die Saugpumpe passieren kann. Der Bagger wird durch zum Ufer führende Seile bewegt oder durch Seile, die an Ankern befestigt sind. Der Abraum wird direkt ans Ufer oder in Kähne gefördert.



PHOTRI



Irtysch die Schleuse mit der größten Hubhöhe (42 m) zu besitzen. Dem steht die John-Day-Schleuse im Columbia-Fluß-Gebiet innerhalb des Mississippi-Wasserstraßensystems mit 34 m nicht sehr nach.

Diese großen Schleusen befinden sich alle entweder in wasserreichen Flüssen oder sind mit solchen verbunden, so daß die Frage des Wasserverlustes ohne Bedeutung ist. Aber selbst bei Kanälen, die Höhenzüge übersteigen, spielt die Versorgung mit Wasser nicht mehr die Rolle für die Schleusengröße wie früher. Moderne Kanalbauer pumpen das bei der Schleusung ablaufende Wasser mit Elektropumpen zurück. Dies ist billiger, als zur Speicherung des Wassers in den Höhenlagen große Stauwerke zu bauen. Außerdem hat man Sparschleusen entwickelt, bei denen ein Teil des Füllwassers in den Sparbecken zwischengespeichert und für die nächste Füllung der Schleusenkammer wiederverwendet wird.

### Schiffshebewerke

Auch wenn Wasser zurück gepumpt oder in Sparschleusen zum Teil zurück gehalten werden kann, bringt eine Vielzahl hintereinander liegender Schleusen einen großen Nachteil mit sich: Das Durchfahren erfordert sehr viel Zeit. Daher haben Ingenieure von Anfang an nach Möglichkeiten gesucht, Wasser und Zeit einzusparen, indem sie verschiedene Schiffshebewerke an die Stelle einer ganzen Schleusenkette setzten. Eines der frühesten noch betriebsfähigen Schiffshebewerke ist das Senkrecht-Hebewerk bei Anderton (Großbritannien) aus dem Jahre 1875.

**Rechts:** Das Montech Hebewerk am Garonne-Seitenkanal in Frankreich. Die Kähne fahren in ein Wasserbecken, das durch einen Damm dicht abgeschlossen wird. Der Damm wird von Lokomotiven die Neigung hinauf geschoben, wobei der Inhalt des Beckens mitbefördert wird. Die Hubhöhe beträgt 13 m.

**Unten:** Für das Apollo-Raumfahrtprogramm erwies sich der Wasserweg als der geeignete beim Transport der Startraketen.



Obwohl es das einzige in England noch bestehende Schiffshebewerk ist und nicht mehr gewerblich genutzt wird, bauten seine Konstrukteure vier weitere, wesentlich größere Hebewerke der gleichen Art, kurioserweise in Belgien, am 'Canal du Centre'. Noch immer heben sie Kähne von 400 BRT. Ebenfalls in Belgien befindet sich das riesige Hebewerk auf längsgeneigter Ebene bei Ronquieres am Charleroi-Brüssel-Kanal. Es ist wohl das größte Bauwerk dieser Art auf der Erde. Die Anlage ist 1,4 km lang und kann Europakähne heben. Im Vergleich dazu steigen im Mittellandkanal über das

Schiffshebewerk Rothensee Schiffe bis höchstens 100 t Tragfähigkeit zur Elbe ab. Eine weitere kühne Art von modernem Hebewerk findet sich bei Montech in Südfrankreich am Garonne-Seitenkanal. Bei ihm schieben Elektroloks einen beweglichen Betondamm, zusammen mit einem geneigten Betontrog, in dem die Kähne auf einem dreieckigen 'Wasserkeil' schwimmen, nach oben.

### Seekanäle

Eine andere Art des Kanals verbindet zwei Meere miteinander, um einen Seeweg abzukürzen. Diese Kanäle sind allerdings wegen der immer größer werdenden Schiffe zum Aussterben verurteilt. Beispielsweise baute man quer durch Schottlands



PONTS ET CHAUSSEES FRANCE

Great Glen den 'Caledonian Canal', damit Segelschiffe den langen und gefährlichen Weg um Kap Wrath vermeiden konnten. Er wurde aber durch den Übergang auf Dampfantrieb für Schiffe und die in diesem Zusammenhang zunehmende Schiffgröße rasch bedeutungslos. Der sehr ähnliche Göttakanal öffnete durch Schweden einen Binnenwasserweg von der Ostsee zur Nordsee, so daß die von den Dänen im Kattegatt erhobenen Schiffahrtszölle nicht bezahlt zu werden brauchten. Aber auch hier wurden die Schiffe bald für den Kanal zu groß.

Der berühmteste Kanalbauer des 19. Jahrhunderts war der Franzose Ferdinand de Lesseps (1805 bis 1894), der Erbauer des Suez-Kanals. Da dieser 171 km lange Kanal durch die Wüste ohne Schleusen auskam, war es später vergleichsweise einfach, ihn nach und nach den Bedürfnissen der Schifffahrt anzupassen.

### Der Panamakanal

De Lesseps plante weiterhin den Durchstich des Isthmus von Panama. Dort wollte er den Pazifik und den Atlantik über einen 80 km langen Kanal miteinander verbinden. Ein Heer von Arbeitern trieb das ehrgeizige Projekt von 1881 bis 1889 voran, doch das Klima und das Gelände waren stärker als sie. Malaria und Gelbfieber rafften die Arbeiter dahin. Durch instabile Gesteinsschichten traten wiederholt Hangrutschungen auf, die das Kanalbett an vielen Stellen verschütteten. Den gegenwärtigen Panamakanal bauten die Amerikaner. Dieser im Jahre 1914 eingeweihte Schleusenkanal ist heute zu langsam und zu klein. Daher erwägt man, ihn durch einen größeren, schleusenfreien Kanal, wie de Lesseps ihn sich vorgestellt hatte, zu ersetzen.

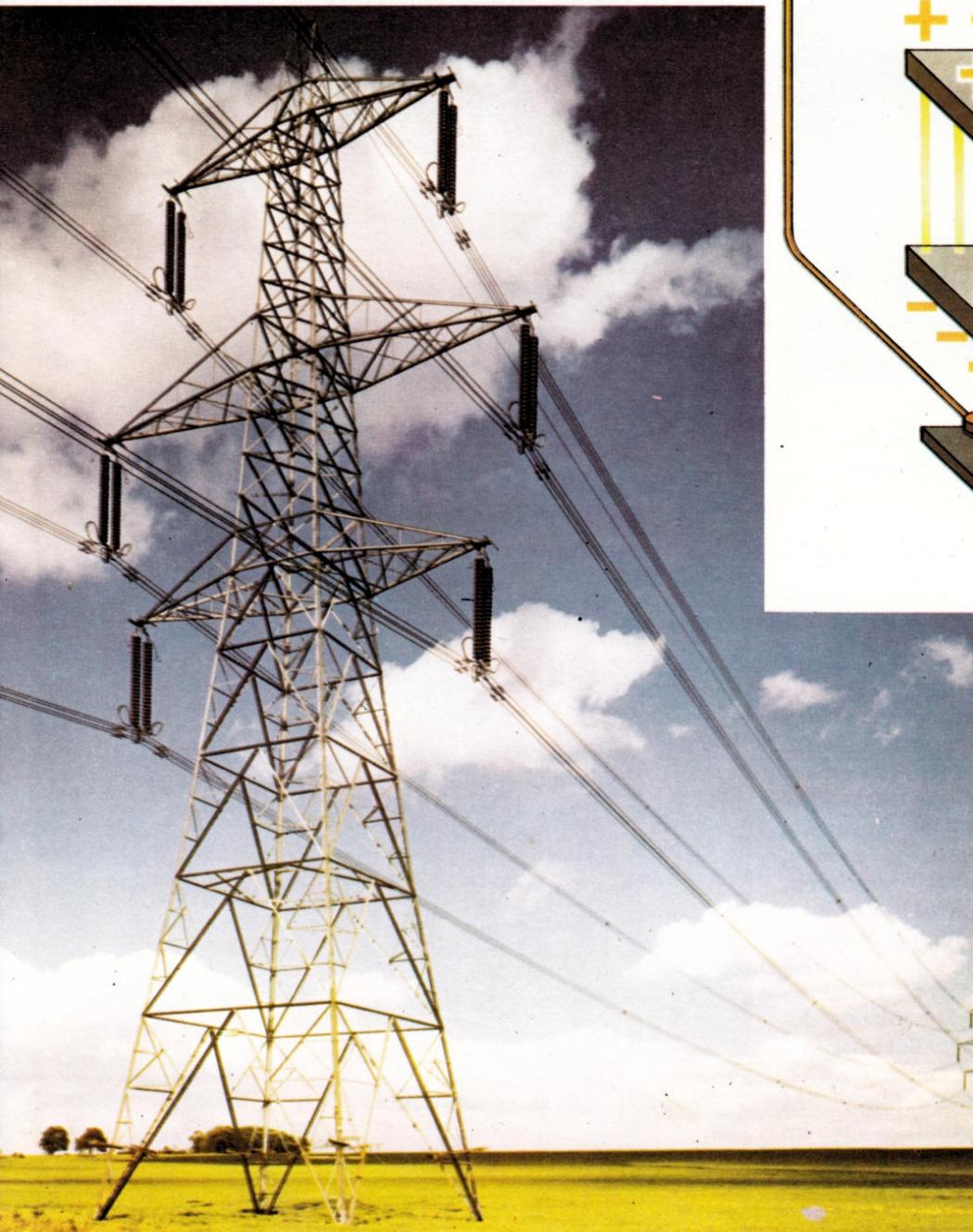
# KAPAZITÄT, ELEKTRISCHE

Alle elektrischen Leiter besitzen eine gewisse Kapazität, die es ihnen ermöglicht, elektrische Ladungen zu speichern. Man kann diese Eigenschaft verstärken, indem man zwei leitende Schichten durch einen dünnen Isolator trennt.

Die elektrische Kapazität ist eine elektrostatische Erscheinung, die sich in der Speicherung elektrischer Ladungen ausdrückt. Bauteile, denen dieses Phänomen zugrunde liegt, werden Kondensatoren genannt. Diese Bauelemente haben in elektronischen Schaltungen große Bedeutung erlangt. Sie bestehen im wesentlichen aus zwei parallelen Platten, die eine bestimmte Kapazität zum Speichern elektrischer Ladungen besitzen.

Die Ladung wird in Coulomb angegeben. Ein Coulomb ist die Ladung von  $6 \cdot 10^{18}$  Elektronen. Sie werden auf den Oberflächen der beiden Platten gespeichert, die durch einen Luftzwischenraum oder durch Isoliermaterial voneinander getrennt sind. Durch die ruhenden Ladungen wird ein elektrostatisches Feld und damit eine Spannung oder eine Potentialdifferenz zwischen den Platten hervorgerufen.

Die Einheit der Kapazität ist das Farad (Abkürzung: F). Definitionsgemäß erhält man ein Farad, wenn man die Ladung

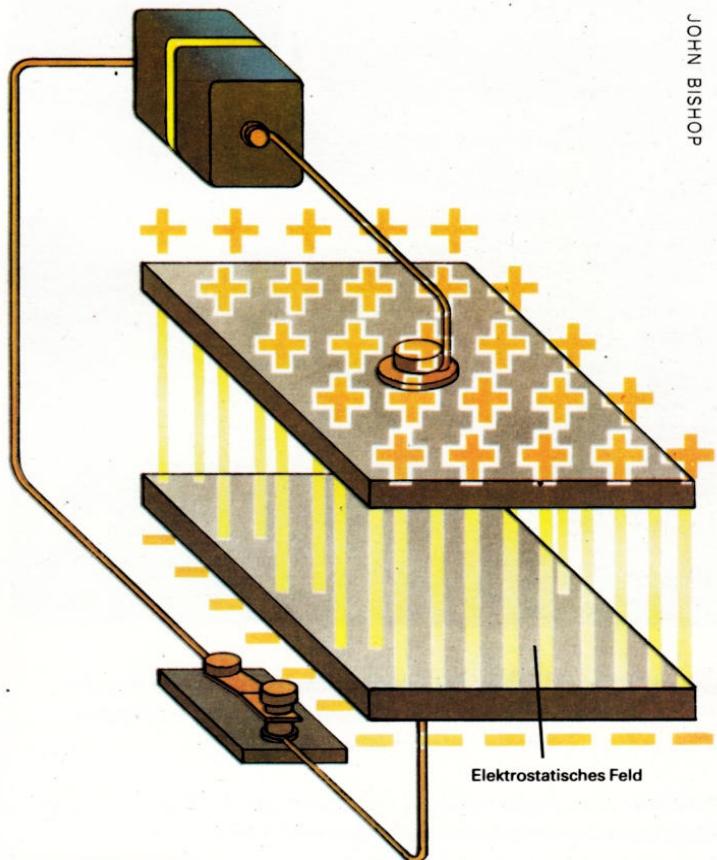


von einem Coulomb durch die Spannung von einem Volt dividiert. Allgemein ist die Kapazität eines Bauteils festgelegt durch den Quotienten aus den auf den Platten gespeicherten Ladungen und der Spannung, die diese Ladungen hervorgerufen haben. Eine Vergrößerung der Kapazität bedeutet demnach, daß mehr Ladungen bei gleicher angelegter Spannung gespeichert werden können.

Es bieten sich drei Möglichkeiten zur Vergrößerung einer Kapazität an: Vergrößerungen der Plattenflächen, Verringerung des Plattenabstandes oder Einfügen eines Materials mit hochwertigeren Isolereigenschaften zwischen den Platten. Die isolierende Schicht bezeichnet man als Dielektrikum.

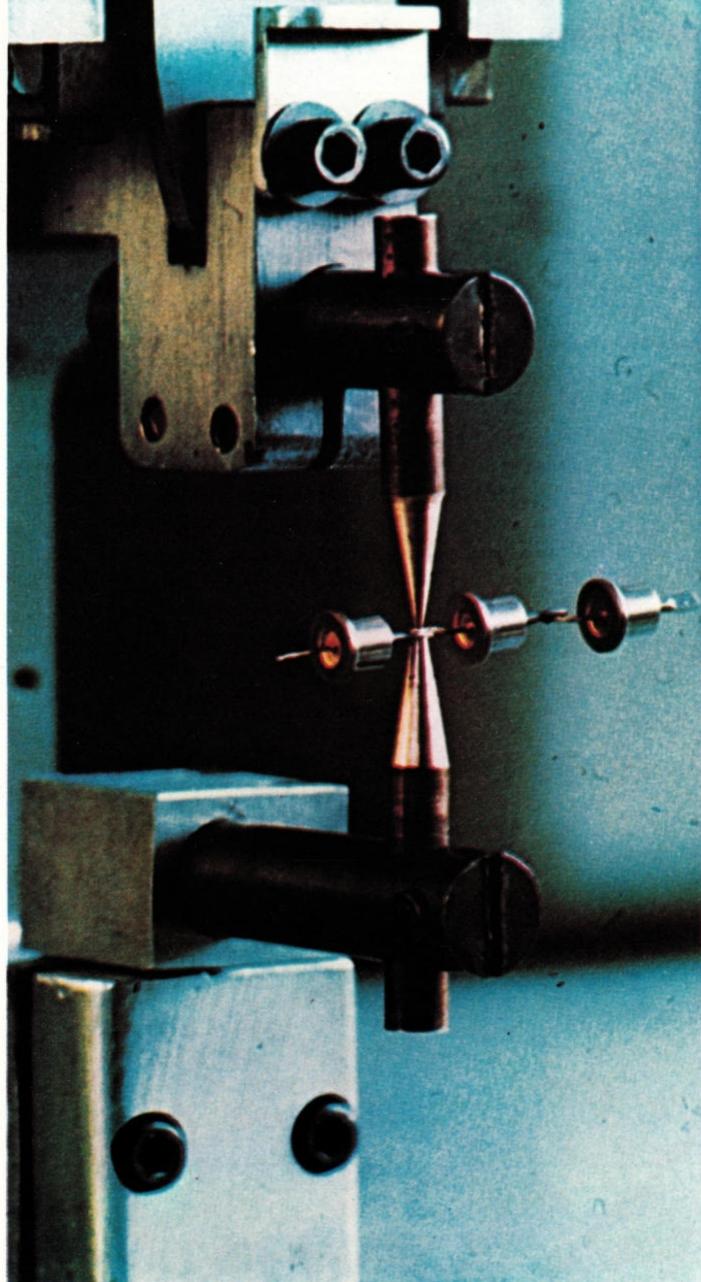
## Dielektrische Materialien

Fügt man einen Isolierstoff oder ein Dielektrikum zwischen die leitfähigen Platten und legt man eine Spannung an, entstehen im Isoliermaterial Polarisationserscheinungen. Die-



**Oben:** Das Diagramm zeigt, wie die Ladungen an einem Kondensator mit parallelen Platten liegen. Bei ausgeschaltetem Schalter gelangen keine Ladungen an die Platten; es entsteht keine Spannung. Bei eingeschaltetem Schalter fließt der Strom, bis die Spannung an den Platten gleich der Batteriespannung ist. Die Platte, die mit dem negativen Pol der Batterie verbunden ist, besitzt negative Ladungen, d.h. sie hat Elektronenüberschuß.

**Links:** Hochspannungsleitung (400 kV) zwischen Sizewell und Sundon in Großbritannien. Das Bild zeigt die langen Leitungsdrähte, deren Kapazität (Ladungsfähigkeit) zu einem Auseinanderklaffen der Phasen von Spannung und Strom führen. Dies führt zu einem Verlust von elektrischer Leistung.



**Oben:** Schweißanlage für elektronische Bauteile, die sich die Kapazität zunutze macht. Bei diesem Schweißen in wenigen Tausendstel Sekunden entsteht kaum Wärme.

**Rechts:** Eine Reihe von Kondensatoren, die die Kapazität von Hochspannungsleitungen ausgleichen und dadurch den Verlust von elektrischer Leistung reduzieren.

ser Vorgang lässt sich als Anordnung von Dipolen im Dielektrikum beschreiben. Als Dipol bezeichnet man ein in sich geschlossenes Gebilde, das aus zwei entgegengesetzt gepolten elektrischen Ladungen in bestimmten Anordnungen besteht. Mit den Dipolanordnungen entsteht ein inneres elektrisches Feld, das Anteile des von der angelegten äußeren Spannung verursachten Feldes aufhebt. Hierdurch wird verständlich, daß sich die Menge der gespeicherten Ladungen vergrößert, wenn bei gleicher angelegter Spannung beispielsweise Luft als Dielektrikum gegen einen besseren Isolierstoff ausgetauscht wird. Dadurch vergrößert sich die Kapazität. Das Verhältnis der neuen Kapazität zu der Kapazität mit Luft als Dielektrikum bezeichnet man als relative Dielektrizitätskonstante des Isolierstoffes. Sie wird durch den griechischen Buchstaben  $\epsilon$  beschrieben.

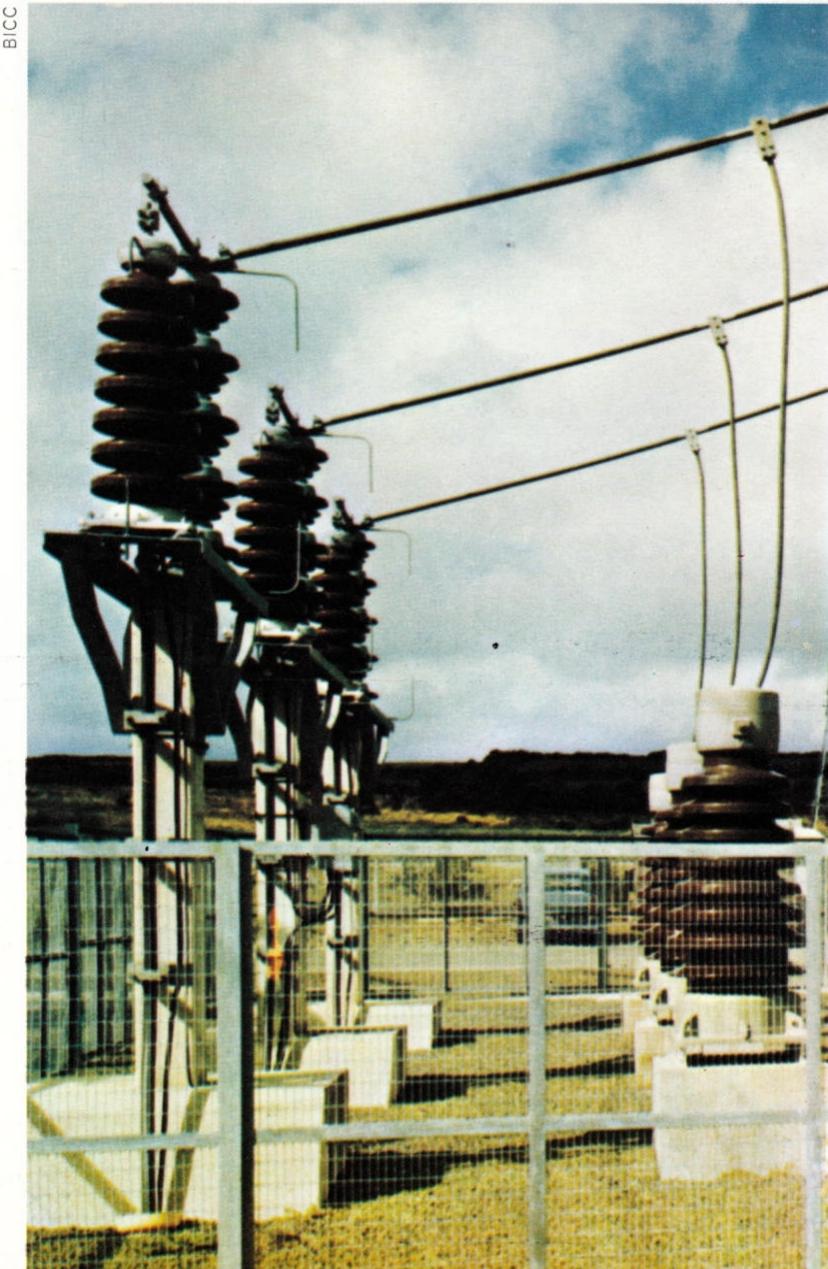
Zur Verdeutlichung seien hier einige typische Materialien mit ihren Dielektrizitätskonstanten aufgeführt: Vakuum  $\epsilon = 1$ , Luft  $\epsilon = 1,00059$  (oft zu 1 abgerundet), Polytetrafluoräthylen (PTFE)  $\epsilon = 2$ , Polystyren  $\epsilon = 2,6$ , Bariumtitanat

$\epsilon = 6000$ . Setzt man Bariumtitanat als Dielektrikum ein, bedeutet dies für einen KONDENSATOR von gegebener Größe und Gestalt, daß sich seine Kapazität um den Faktor 6000 vergrößert.

### Kondensatoren in elektrischen Schaltungen

Schaltet man eine Batterie, einen Schalter, einen Widerstand und einen Kondensator zu einem einfachen elektrischen Kreis zusammen, beobachtet man die folgende Spannung/Strom-Beziehung: Bei offenem Schalter kann kein Strom in der Schaltung fließen. Besitzt der Kondensator noch keine gespeicherten Ladungen, liegt auch keine innere Spannung an seinen Platten. Schließt man den Schalter, fließt ein Strom durch die Schaltung, dessen Größe nach dem Ohmschen Gesetz von der Größe der Batteriespannung und dem Widerstand im Kreis bestimmt wird. Durch den Strom bauen sich Ladungen an den Kondensatorplatten auf, womit sich auch eine Spannung über ihnen einstellt. Deswegen verringert sich nun auch die treibende Spannung, die von der Batterie geliefert wird. Im Kreis wirksam ist jetzt nur noch die Differenz zwischen dieser und der an den Platten anliegenden Spannung. Entsprechend kleiner wird auch der fließende elektrische Strom. Der elektrische Strom hört dann auf zu fließen, wenn die Spannung am Kondensator gleich der von der Batterie gelieferten Spannung ist. Damit ist der Ladevorgang beendet.

Wird danach der Schalter geöffnet, behält der Kondensator seine Ladung. Theoretisch kann er die Ladung unendlich lange halten. In der Praxis sind aber immer Leck- oder Ver-



lustströme vorhanden, wodurch die gespeicherte Ladung allmählich abgebaut wird.

Entfernt man die Batterie und schließt den Kreis, kann der Entladungsvorgang einsetzen. Wird der Schalter erneut eingeschaltet, fließt der Strom in umgekehrter Richtung durch den Schaltkreis. Die treibende Spannung liefert nun der Kondensator, dessen Plattenspannung gleich der zuvor entfernten Batterie ist. Die Größe des Stromes hängt von dem Verhältnis aus der Spannung und dem Ohmschen Widerstand ab. Durch den Stromfluß wird die Ladung des Kondensators abgetragen; seine Spannung sinkt und mit ihr auch der Betrag des Stromes. Die Entladung wird so lange fortgesetzt, bis Spannung und Strom nicht mehr nachweisbar sind.

### Wechselspannungsschaltungen

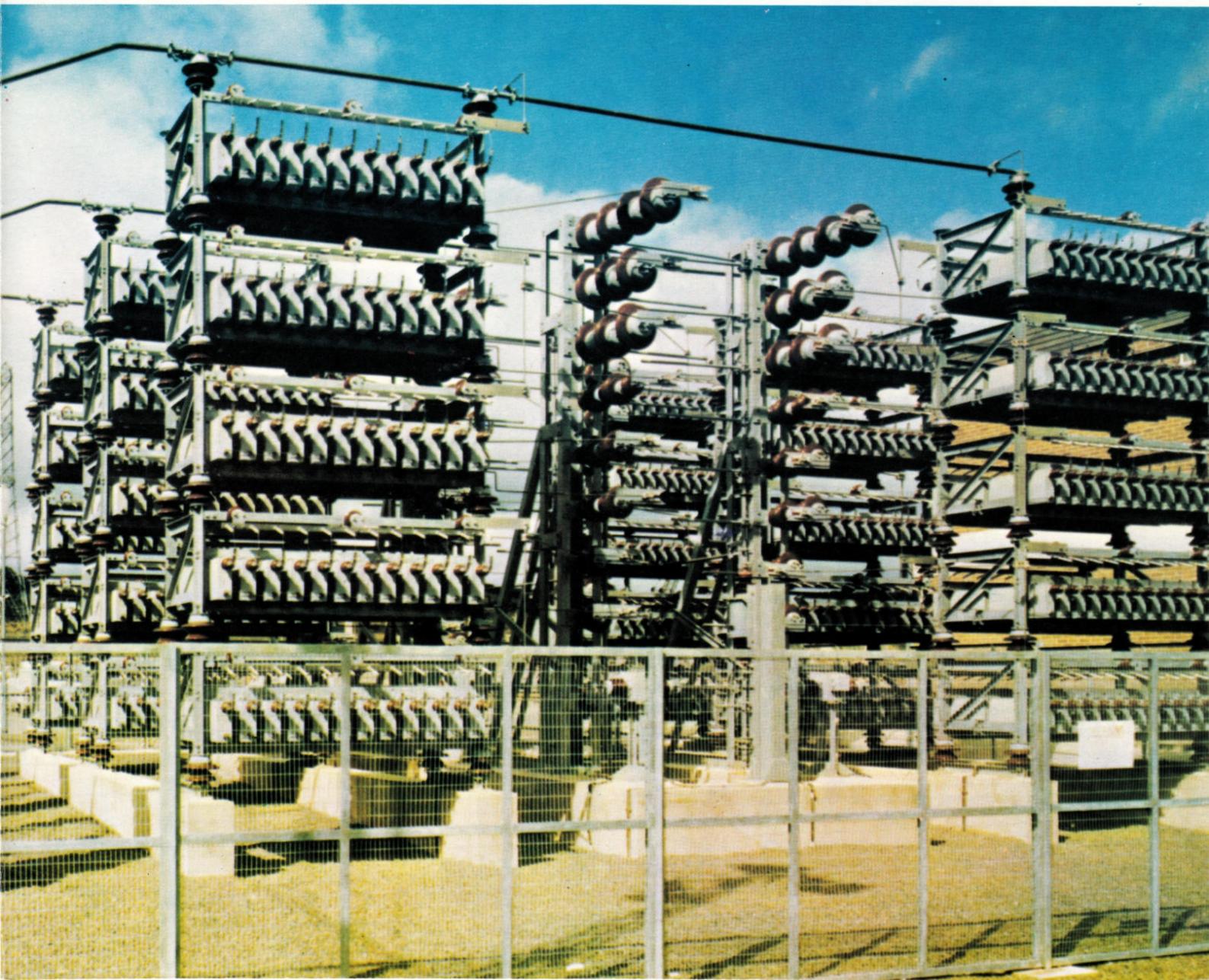
Fügt man anstelle der Batterie eine Wechselspannungsquelle ein, durchläuft der Kondensator einen Zyklus, bei dem er ständig auf- und entladen wird. Vergrößert sich die Frequenz der Wechselspannung, verbleibt dem Kondensator wenig Zeit, Ladungen aufzunehmen, bevor die negative Halbschwingung einer Wechselspannungsperiode die Entladung einleitet. Es lässt sich erkennen, daß die größtmögliche Spannung über dem Kondensator immer niedriger ausfallen wird. Bei zunehmenden Frequenzen wird die Wirkung des Kondensators in der Schaltung immer unbedeutender, d.h. der im Schaltkreis fließende elektrische Strom wird nur noch von der Spannungsquelle und dem Widerstand bestimmt.

### Anwendungen

Das Verhalten eines Kondensators in einer elektrischen Schaltung ist davon abhängig, ob Gleich- oder Wechselspannung angelegt wird. Wird der Kondensator mit Gleichspannung betrieben, ist die Ansammlung von Ladungen auf seinen Platten eine Möglichkeit, elektrische Energie zu speichern. Diese Energie kann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten wieder freigesetzt werden. Als Beispiel einer solchen Energiespeicherung sei der Kondensator im Blitzlichtgerät angeführt.

Die frequenzabhängigen Eigenschaften des Kondensators in einer Wechselspannungsschaltung führen zu mehreren wichtigen Anwendungen, wie Unterdrückung von Funkstörungen, die z.B. in Zündanlagen von Kraftfahrzeugen entstehen. Man benötigt den Kondensator zur Impulsformung oder auch zur Glättung von Brummspannungen in Netzteilen. Durch Einfügen eines Kondensators können Ströme hoher Frequenzen ausgefiltert und gleichermaßen niedrige Frequenzen bis hin zu Gleichströmen abgeblockt werden.

Bisher wurden nur ideale Kondensatoren besprochen. In praktischen Anwendungen jedoch weisen alle dielektrischen Materialien einen bestimmten elektrischen Widerstand auf. Dies bedeutet, daß beispielsweise nach Anlegen einer Gleichspannung ein kontinuierlicher Leckstrom durch den Kondensator fließt. Bei in der Praxis ausgeführten Schaltungen müssen solche Unzulänglichkeiten gegenüber den theoretischen Betrachtungen in Erwägung gezogen werden.



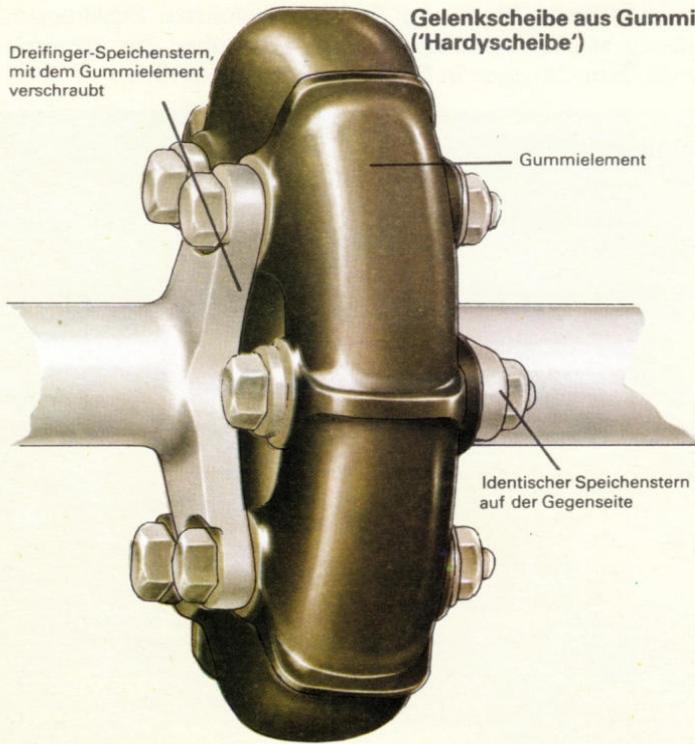
## KARDANGELENKE

Durch ein Kardangelenk kann eine rotierende Welle mit verschiedenen Beugungswinkeln arbeiten. Ohne sie wären zahlreiche moderne Maschinen, im besonderen der vorderradgetriebene PKW, nicht funktionstüchtig.

Man hat Kardangelenke Jahrhunderte hindurch verwendet. Die Konstruktion wird dem Mathematiker Geronimo Cardano (1501 bis 1576) zugeschrieben (daher auch der Name 'Kardangelenk'), aber die erste verwendbare Ausführung schuf etwa hundert Jahre später Robert Hooke (1635 bis 1703). Sie bestand aus zwei einfachen Hakenbügeln, je einem an den Enden zweier Wellen, die durch ein kreuzförmiges Gelenkstück (Kreuzstab) miteinander verbunden waren. Die modernen Kreuzgelenke arbeiten nach genau dem gleichen Prinzip. Heute werden jedoch statt der einfachen Gleitlager Nadellager eingesetzt.

### Kreuzgelenke

Es gibt verschiedene Spielarten der Grundform: Das Ringgelenk, bei dem der Kreuzstab durch einen Ring ersetzt ist; das Schleifengelenk mit Gabelführungen, die in Nuten des



Gegenstückes (z.B. eine Kugel) gleiten. Das Schleifengelenk bildet mit dem Gegenstück ein eigenes, vollständiges Bauteil, sobald die Gabelführung die Kugel um mehr als die Hälfte überdeckt und damit gleichsam umschließt. Eine weitere Spielart ist das Zweikugel-Topfgelenk, bei dem ein T-Stück auf einer Welle und ein Hohlzylinder mit Innennuten auf der anderen Welle sitzen. Am Ende des T-Stückes bewegen sich gleitend gelagerte Flächen mit ihrer Krümmung in den Nuten des Zylinders. Durch die Lager ist eine Bewegung im rechten Winkel zur Ebene des T-Stückes möglich. Durch die Führung in den Nuten ist eine Bewegung in der Ebene des T-Stückes möglich.

In Fällen, in denen nur ein kleiner Beugungswinkel zwischen den Wellen vorgesehen ist oder in denen Drehmomentumkehrungen (Lastwechsel) und Schwingungen auftreten, kann das Verbindungsstück zwischen den Wellen (also das Gelenk) entweder ganz aus Gummi hergestellt oder mit Gummi gedämpft werden. Am häufigsten bedient man sich dazu der



**U-Bolzen-Gelenk**

**Oben:** Das Gelenk mit eingelegtem Gummikreuz wird von U-Bolzen zusammengehalten. Das Kreuz ist in der Mitte.

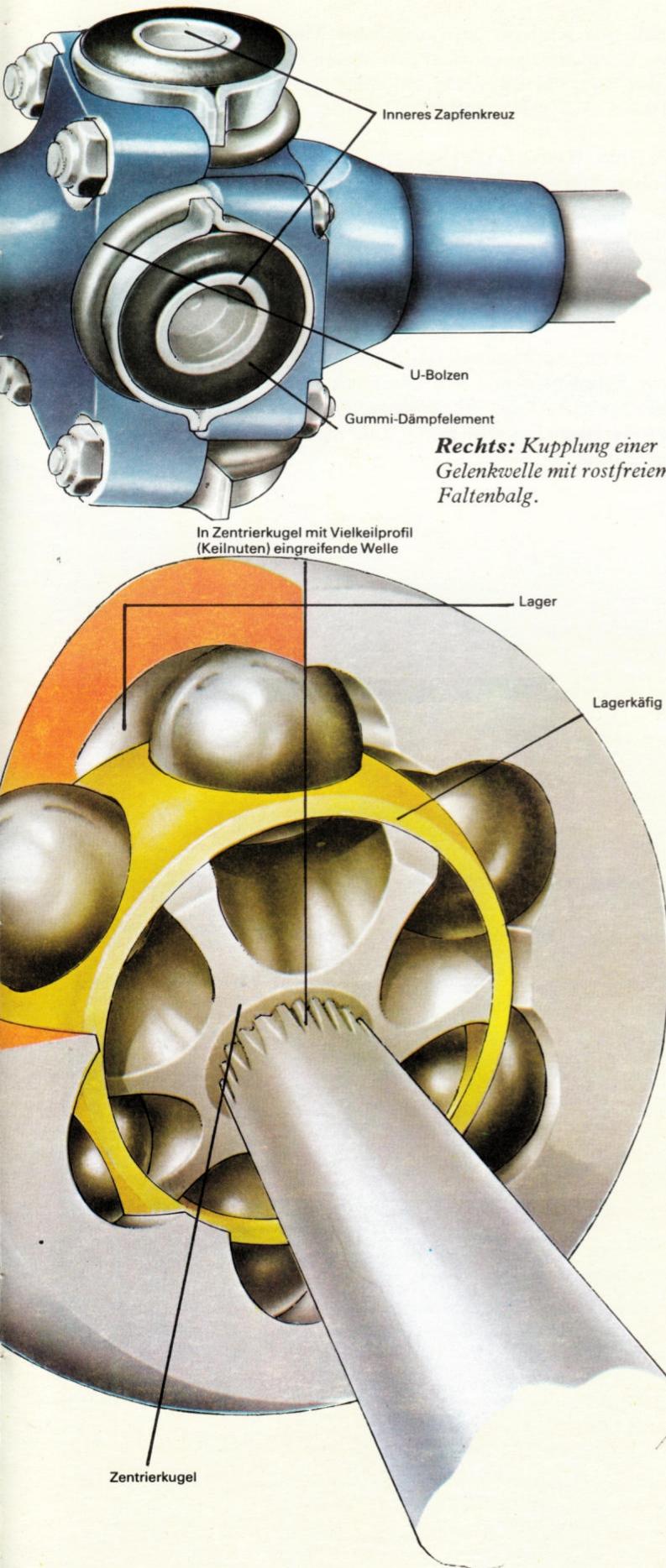
**Gleichgang-Gelenk nach Rzeppa (Birfield)**



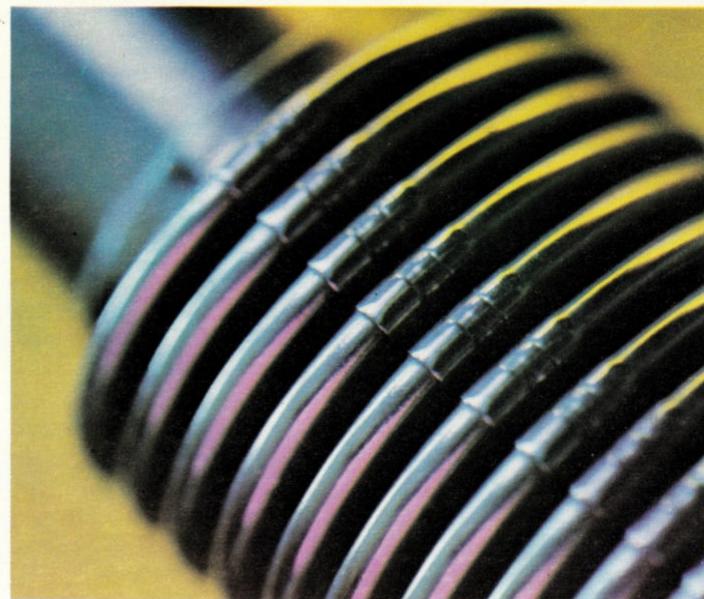
**Links:** Die Hardy-Gelenkscheibe lässt Bewegungen zwischen den beiden Wellen zu.

**Unten:** 'Universalgelenk' für Steckschlüsselsätze.





**Rechts:** Kupplung einer Gelenkwelle mit rostfreiem Faltenbalg.



Layrub-Kupplungen und der sogenannten Hardyscheiben (Gummi-Gelenkscheiben, wie sie beispielsweise in einigen Personenkraftwagen der Firma BMW für den Antrieb der Gelenkwelle Verwendung fanden), die auch eine gewisse Eigenbewegung der Wellen gegeneinander ermöglichen. Man findet aber auch Gelenke mit eingelegtem Gummidämpflement.

### Gleichgang-Gelenke (Homokinetische Gelenke)

Insbesondere für den Vorderradantrieb von Personenkraftwagen haben diese elastischen Kupplungen und die gewöhnlichen Kreuzgelenke leider eine unerwünschte Eigenschaft: Dreht sich eine Welle mit konstanter Drehzahl und fluchtet die Gegenwelle nicht genau mit ihr, dreht diese sich mit einer während der jeweiligen Umdrehung zyklisch abweichenden Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit der einen Welle weicht im Verhältnis zur anderen in Form einer Sinuswelle ab, obwohl beide in der gleichen Zeiteinheit die Umdrehung vollziehen.

Bei der formschlüssigen Kupplung zwischen GETRIEBE und DIFFERENTIAL eines Personenkraftwagens in Standardbauweise (Motor vorne, Antriebsachse hinten) treten keine Schwierigkeiten auf, weil die Winkel sehr klein sind. Doch für den Antrieb gelenkter Räder, also der Vorderräder, wo Beugungswinkel von  $40^\circ$  (bis  $48^\circ$ ) am äußeren Antriebsgelenk auftreten, wären die dadurch hervorgerufenen Schläge nicht immer hinzunehmen, so daß vollkommen gleichförmig arbeitende Gelenke erforderlich sind.

### Das Rzeppa- (oder Birfield-) Gelenk

Eine vollkommen gleichförmige Bewegungsübertragung bedingt, daß die Punkte, über die das Drehmoment von einer Seite zur anderen übertragen wird, auf der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Wellen liegen. Es gibt noch eine einfachere Möglichkeit, die unerwünschten Geschwindigkeitsunterschiede zu beseitigen: Mit Doppelgelenken, bei denen die Schwingungen sich gegenseitig aufheben. Doch sind solche Doppelgelenke ziemlich lang, weshalb in den meisten Fällen Gleichgang-Gelenke verwendet werden. Am bekanntesten sind Rzeppa- oder Birfield-Gelenke mit einer zusätzlichen Verschalung. Bei ihnen erfolgt die Kraftübertragung über sechs Kugeln, die durch einen zentrierten Käfig in der Wirkungsebene gehalten werden, während die Einstellung auf die Winkelhalbierende durch die zueinander versetzten inneren und äußeren Laufbahnradien erfolgt, womit der Gleichgang gewährleistet ist.

**Oben:** Das Gelenk nach Rzeppa (Birfield) ermöglicht eine vollkommen gleichförmige Bewegungsübertragung, weil der Kugelkäfig auf der Winkelhalbierenden der Wellen liegt.

## KASTENTRÄGERBRÜCKE

**Im Brückenbau müssen tragende Teile so leicht wie möglich sein. Durch hohl ausgeführte Kastenträger hat man erreicht, daß Brücken mit einer Spannweite von mehr als 1 000 m gebaut werden können.**

Ein Kastenträger ist hohl und hat entweder einen rechteckigen oder einen trapezförmigen Querschnitt. Seine geringe Wandstärke gewährleistet Festigkeit bei niedrigem Gewicht. Er wird gewöhnlich aus Blechen hergestellt, die teils aus Flüssstahl, teils aus hochfestem Stahl bestehen, wobei innen aussteifende Querrippen an die Stege angeschweißt werden. Kastenträger sind im modernen Brückenbau weit verbreitet. Sie ermöglichen einen schlanken Baukörper bei sparsamen Materialeinsatz. Sie finden sowohl zum Bau von Eisenbahn- als auch von Straßenbrücken, gelegentlich in Verbindung mit einer Betondecke, Verwendung. Auch seilverspannte Brücken werden mit

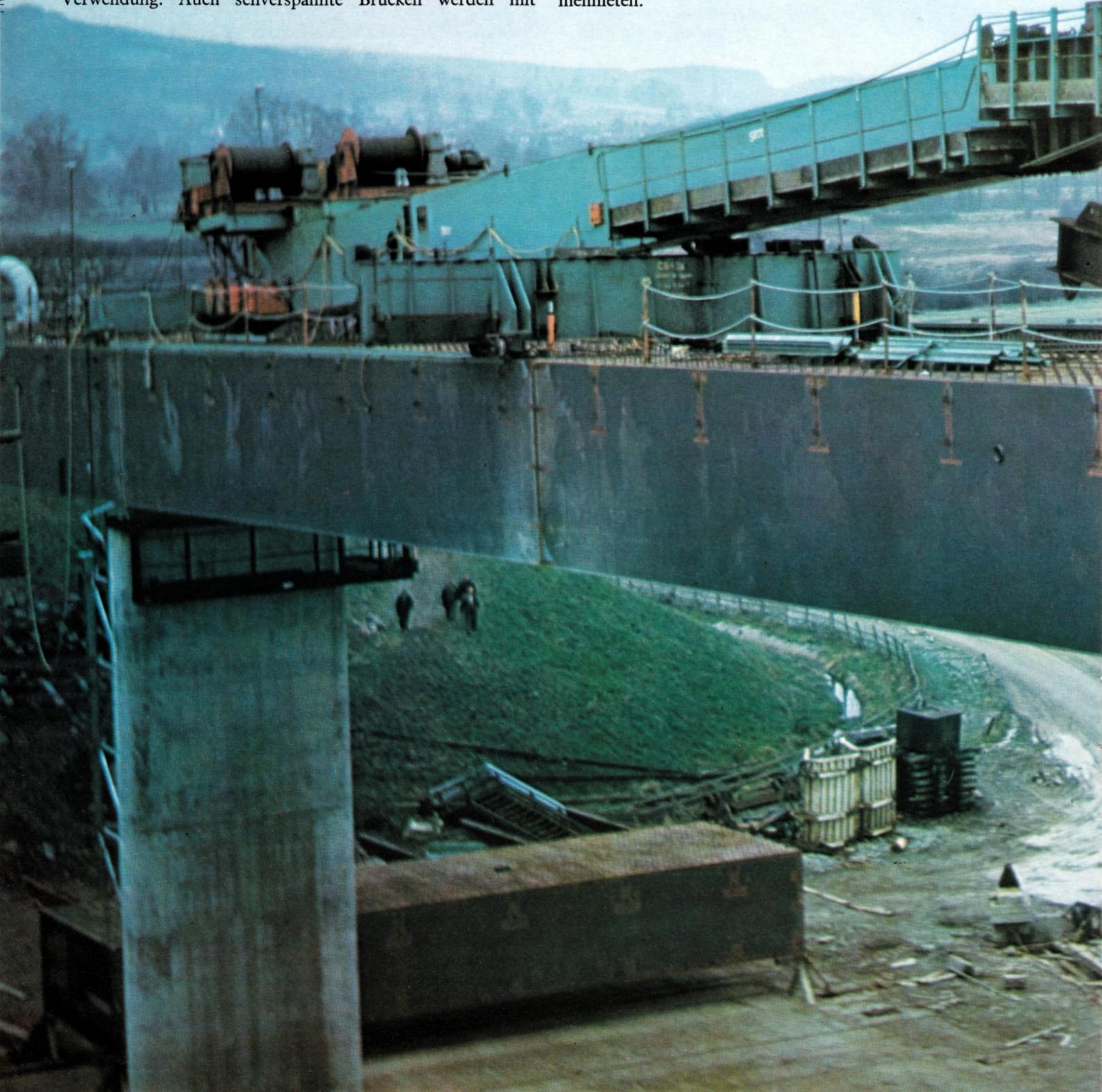
stählernen Kastenträgern ausgeführt. Moderne HÄNGEBRÜCKEN, wie beispielsweise die über den Severn in England oder die im Jahre 1973 fertiggestellte BRÜCKE über den Bosporus in der Türkei sind in Kastenträger-Bauweise ausgeführt.

### Frühe Konstruktionen

Robert Stephenson arbeitete als erster mit Kastenträgern, als er 1849 bis 1850 die Britannia-Eisenbahnbrücke über die Meerenge bei Menai in Wales baute. Bei dieser Brücke fuhren die Züge buchstäblich durch rechteckige 'Stahlrohre'. Diese hohlen Kästen wirkten als durchlaufende Balkenträger. Mit einer Spannweite von zweimal 140 m war die Britannia-Brücke seinerzeit die längste Balkenträgerbrücke der Welt.

Das einzige Material, das Stephenson zur Verfügung stand, war Schmiedeeisen, und das auch nur in Abschnitten von  $46 \times 1,3 \text{ cm}^2$ . Um die nötigen Abmessungen zu erhalten, mußte man eine sehr große Zahl solcher Abschnitte zusammennieten.

ILLUSTRATION: FOX



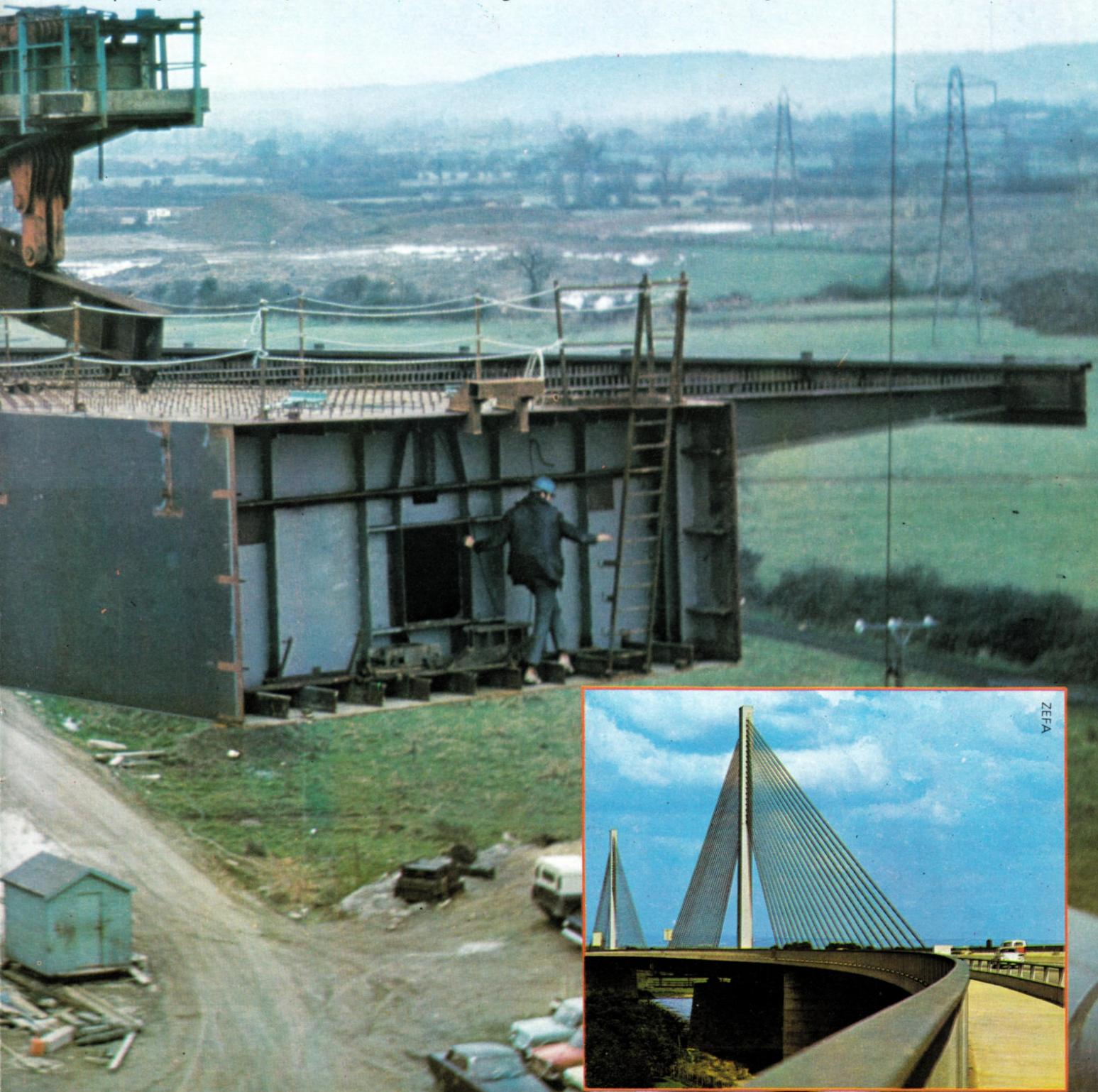
Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts war Stahl ein teurer Werkstoff, von dem nur geringe Mengen erzeugt werden konnten. Seine Massenproduktion wurde mit der Erfindung des Bessemerverfahrens (1856) möglich. Gußeisen ist zwar leicht in der gewünschten Form herzustellen, aber es ist spröde und lässt sich nur schwer in gleichbleibender Qualität fertigen. Außerdem ist sein Zugverhalten unzuverlässig. Schmiedeeisen ist reiner und leichter verformbar als Gußeisen, aber sehr teuer. Stahl hat den Vorzug, daß er in gleichbleibender Qualität und mit genau berechenbaren Eigenschaften hergestellt werden kann. Schwere Stahlbauteile mit kompliziertem Profil können nur dann wirtschaftlich in Massenproduktion hergestellt werden, wenn sie gerade sind und ihr Profil über die ganze Länge gleichförmig ist. Damit wurde es billiger, sie in Form eines hohen Fachwerks statt in Form eines großen Hohlkastens zusammenzufassen. Erst seit Mitte der 40er Jahre unseres Jahrhunderts haben die großen

Fortschritte bei der Elektroschweißung eine Verbindung relativ dünner Bleche ermöglicht.

### Vorzüge

Als erst einmal ein zufriedenstellendes Verfahren zur Verbindung der Bleche gefunden war, bot der Hohlkasten eine Reihe von Vorteilen. Ein stählernes Bauteil kann in dieser Form drei Aufgaben erfüllen: als Teil des Hauptträgers dienen, die über die Brücke gehende Last verteilen helfen und schließlich Teil der eigentlichen Brückendecke sein. Ein weiterer Vorteil der Kastenbauweise ist die große Verwindungsfestigkeit (Torsionsfestigkeit). Torsionsmomente

*Montage eines Brückenteils während des Baus der Brücke über den Avon in England. Im Bild unten rechts die Ebert-Brücke in Bonn, die den Rhein überspannt.*



entstehen meist bei einseitiger Belastung, beispielsweise bei einseitiger Sperrung einer Straßenbrücke, oder bei einer mehrgleisigen Eisenbahnbrücke, über die nur ein Zug fährt. Man kann Kastenträgern meist ohne weiteres ein windschnittiges Seitenprofil geben. Dabei beträgt dann die Belastung der Brücke durch die Windkräfte nur einen Bruchteil der Belastungen, die die vielen Teile eines Fachwerkträgers mit der gleichen Funktion aufnehmen müßten.

Die Schwierigkeit bei der Kastenbauweise liegt darin, daß die Bleche sich unter der Einwirkung von Stauchdruck wellig verbiegen können, und zwar möglicherweise bereits bei einem Teil der Belastung, die das Blechprofil aufnehmen könnte, wenn es weniger materialsparend und daher widerstandsfähiger ausgeführt wäre.



## Belastungen

Wie dünn die Wandungen von Kastenträgern sind, kann man erkennen, wenn man einen Bogen Papier von 20 cm Breite und 0,1 mm Stärke zu einem Würfel von 5 cm Kantenlänge faltet. Er entspricht in den Größenverhältnissen einem 10 m langen Kastenträger mit 2 cm starken Stegblechen. Da ein Kasten mit glatten Gurten und Stegen sich leicht verziehen kann, werden Aussteifungsstreben angeschweißt, die die gleiche Wirkung haben wie die 'Wellen' in der Wellpappe. Die Festigkeitsberechnung für ein derart versteiftes Blech ist sehr kompliziert.

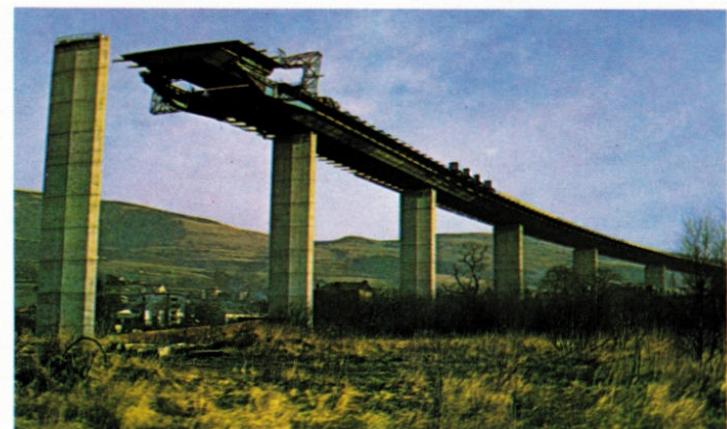
Die Festigkeit des Blechs wird durch das Schweißen selbst beeinflußt, und zwar schon während die Schweißnaht aufgebracht wird und später, wenn sie sich beim Erkalten zusammenzieht. Ist die Schweißnaht ausgehärtet, findet eine weitere Schrumpfung statt. Dabei wirken von ihr ausgehend Zugkräfte auf das Blech. Häufig führt das zu starkem Verziehen und auch zu Dauerbelastungen. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, daß Baustahl über die elastischen Eigenschaften hinaus bei zu hoher Zugbelastung auch 'fließen' kann. Dadurch kann eine dauerhafte (plastische) Verformung eintreten, so daß das Material zwar noch die Lasten aufnimmt, aber zugleich dauerhaft verzogen ist, ohne jedoch zu brechen. Ein gewisses Maß an Nachgiebigkeit des Stahls kann in vielen Fällen hingenommen werden; durch sie können sogar örtliche Belastungsspitzen (Belastungskonzentrationen) abgebaut werden, die durch Schweißung oder auf andere Weise entstanden sind. Es wäre unwirtschaftlich, wollte man die berechnete Spitzenlast (einschließlich der Belastungen durch das Schweißen und alle anderen denkbaren Belastungsfaktoren) niedriger ansetzen als den Wert, bei dem ein Fließen auftreten kann. Auf der anderen Seite müssen noch geeignete Verfahren gefunden werden, um die tatsächliche Festigkeit unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit zu berechnen.

## Bau der Brücke

Kastenträger sind einfacher herzustellen als aus mehreren Teilen montierte Träger. Da sie in größeren Stückzahlen gefertigt werden können, bleiben die Kosten pro Stück in Grenzen. Die Innenflächen der Kästen sind nicht der Wetterwirkung ausgesetzt, lassen sich also leicht schützen; hierdurch werden die Wartungskosten gesenkt. Oft werden Hohlkästen in größeren Abschnitten vorgeschnitten, so daß sie an Kränen in die Brücke eingeschwenkt werden können. Wo ein Vorschweißen nicht möglich ist, oder wenn es um den Bau von sehr hohen Brücken geht, läßt sich die Brückentafel Stück um Stück herstellen, indem man von den Pfeilern aus über einen Tragarm mit einem Vorbauwagen arbeitet. Dabei wird der jeweilige Abschnitt an das bereits fertige Stück der Brückentafel angeschweißt.

**Links:** Ein Bild der Britannia-Brücke in Wales, der ersten Kastenträgerbrücke der Welt.

**Unten:** Bau der Erskine-Brücke über den Clyde in Schottland. Die Kastenträger sind zur Verminderung des Windwiderstandes stromlinienförmig gestaltet. Ohne diese Anordnung würde der Windwiderstand, vor allem im mittleren Brückenabschnitt sehr groß sein. Die Gesamtspannweite der Brücke ist 300 m.



fel angesetzt, womit der Vorbauwagen wieder ein Stück vorrücken kann.

## Brücken

In den frühen 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden zahlreiche Untersuchungen über Kastenträgerbrücken angestellt, in der Hauptsache deswegen, weil diese Bauweise durch den Einsturz von vier großen Brücken während des Baus in Verruf gekommen war.

Die meisten Kastenträgerbrücken sind weit weniger spektakulär als die, um die es in diesen Fällen ging, weil bei ihnen die Kastenträger lediglich die Doppel-T-Profilträger ersetzen, die für einfache Straßen- oder Eisenbahnüberführungen eine Beton-Brückentafel tragen. Für Spannweiten bis zu 150 m ist eine Brückentafel aus Beton wirtschaftlich, bei größeren Lichtweiten hingegen werden die höheren Kosten für eine Brückentafel aus Stahl dadurch ausgeglichen, daß keine Stützträger erforderlich sind, da eine Brückentafel aus Stahl nur ein Drittel so viel wiegt wie eine aus Beton.



# Erfindungen 22: WASSERLEITUNG

In der Jungsteinzeit, zwischen 9000 v. Chr. und 4000 v. Chr., als die Siedlungen noch klein waren, vermochten Brunnen und Quellen ausreichend Wasser für die dort wohnenden Menschen zu liefern. Als sich später allerdings im Vorderen Orient große Städte entwickelten, mußte Wasser oft über beträchtliche Entfernungen aus Speicherbecken an die Siedlungen herangeführt werden. Gewöhnlich geschah dies in gedeckten Kanälen oder 'Leitungsrohren' aus Stein. Die Abdeckung sollte vor Verdunstung und Verunreinigung schützen. Aus der Zeit ab 4000 v. Chr. ist aus Städten des Nahen Ostens eine ganze Anzahl solcher Leitungen bekannt. Ihren höchsten Entwicklungsstand erreichte diese Art des Wassertransports zur Zeit des Römischen Weltreichs; noch heute sind viele römische 'Aquädukte' (Wasserleitungen) vollständig erhalten.

## Aquädukte

Allerdings gab es bei den Aquädukten eine Reihe von Nachteilen. Man konnte zwar auf diese Weise Wasser zu den Vorratsbehältern in den Städten leiten; für die Weiterleitung zu

einzelnen Gebäuden waren sie jedoch zu umständlich. Ein weiterer Nachteil war, daß Wasser im Aquädukt auf dem Weg von der Quelle zum Bestimmungsort ständig über ein leichtes Gefälle fließen mußte. Man konnte bei dieser Art des Wassertransports Wasser nicht bergab und wieder bergauf fließen lassen. Außerdem waren Aquädukte für die Abwasserbeseitigung nicht in idealer Weise geeignet, weil ihre Abdeckungen nicht immer an ihrem Platz blieben.

## Tonröhren

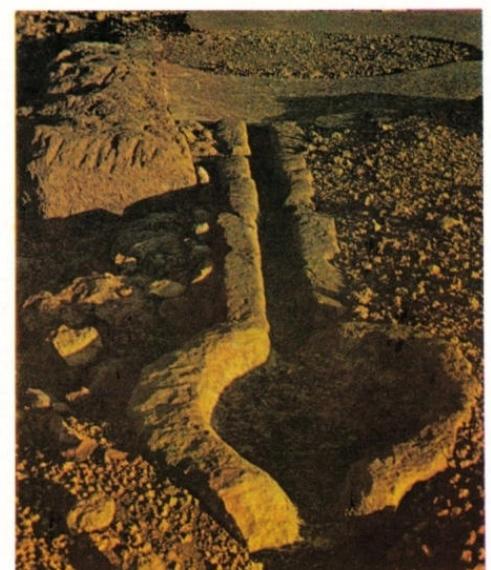
Die ältesten bekannten Wasserleitungen befanden sich in den Städten des Nahen Ostens und im Pandschab

(Fünfstromland). Sie waren aus kurzen Tonröhren zusammengesetzt, die oft jeweils auf einer Seite aufgeweitet waren, damit Rohre leichter mittels Bitumen miteinander verbunden werden konnten. Schon damals scheint man Röhren bereits in 'genormten' Größen hergestellt zu haben. Wasser wurde nicht nur zu öffentlichen Bädern, sondern auch zu Springbrunnen und Toiletten mit Wasserspülung geleitet. Ähnliche Tonröhren wurden mehr als Tausend Jahre später auch in Knossos auf Kreta verwendet, mit dem Unterschied, daß sie hier konisch geformt waren, so daß das verjüngte Ende in das weitere Ende des Ansatzrohres paßte. An jeder Seite dieser Röhren waren



**Rechts:** Das von den Römern in Hama (Syrien) erbaute Wasserversorgungssystem ist noch heute — gründlich überholt — in Gebrauch.

**Unten:** Wasserleitung aus Tonröhren in den Ruinen Trojas.



**Oben:** Teil eines karthagischen Abwassersystems. Das Karthagerreich breitete sich entlang der nordafrikanischen Küste aus.

Ösen angebracht, durch die sie mittels Schnüren aneinander befestigt werden konnten.

### Metallrohre

Die ältesten, uns bekannten Wasserleitungen aus Metall stammen aus Ägypten. Sie gehen auf die Zeit um 2000 v. Chr. zurück. Jedes Rohrstück war aus einem rechteckigen Stück Kupferblech zylinderförmig zurechtgebogen und an der Verbindungsstelle überlappend 'gefaltet'. Solch ein Zylinder war etwa 45 cm lang und hatte einen Innendurchmesser von rund 9 mm. Da Kupfer teuer war, fanden Metallrohre erst weitere Verbreitung, als nach 1000 v. Chr. Blei in größeren Mengen zur Verfügung stand (es fiel als Nebenprodukt bei der Silbergewinnung aus Galenit oder Bleiglanz an). Sie wurden aus Bleiblech gefertigt, das zu Zylindern gerollt und mit Zinn verlötet wurde. Im Rom der Antike waren solche Leitungen in den Größen von 13 cm, 20 cm und 25 cm genormt, je nachdem, wie breit das jeweilige Stück Bleiblech war.

Solche Leitungen wurden vor allem dazu verwendet, Wasser in Städten zu verteilen. In einigen Fällen allerdings schaffte man auch durch die Leitungen das Wasser von der Quelle herbei. Beispielsweise wurde Wasser über eine Entfernung von 24 km durch Tonröhren zur phönizischen Stadt Sidon (heute Saida, südlich von Beirut) geleitet. Durch Bronzeleitungen brachte man Wasser in der Hafenstadt Tyrus von den Festlandteilen zu den Inseln. Die griechische Stadt Pergamon in Kleinasien wurde von einer Quelle an einem nahegelegenen Berg durch eine Hebeleitung aus einer Höhe von 30 m über ein dazwischenliegendes Tal mit Wasser versorgt, das 150 m tiefer als die Stadt lag.

### Installationen in Rom

Wohl nirgendwo wurden in der Antike bleierne Leitungen in so großem Umfang eingesetzt wie in Rom. Zwar wurde Wasser durch Aquädukte in die Stadt geleitet, aber

**Oben:** Bohrmaschine zum Aushöhlen von Stämmen, abgebildet in einem Buch von 1664. Die mit E gekennzeichneten Holzbohrer bohrten vergleichsweise enge Löcher.

**Rechts:** Plan der Kathedrale von Canterbury aus dem 12.Jahrhundert. Das Wasser ist grün, die Leitungen sind rot eingezeichnet.

innerhalb der Stadt lief es durch Bleirohre, die an Speicherbehälter angeschlossen waren, in Privathäuser und zu Springbrunnen auf öffentlichen Plätzen. Die privaten Abnehmer zahlten eine Steuer entsprechend dem Rohrdurchmesser ihrer Leitung. Selbst nach heutigen Maßstäben war der Wasserverbrauch verschwendatisch. Um das Jahr 100 n. Chr. lag er bei nahezu 1400 l/Tag und Kopf der Bevölkerung. Das ist ein Pro-Kopf-Verbrauch, der den heutigen Wasserverbrauch in den meisten Großstädten um das Sechsfache übertrifft!

Zweifellos ging ein Großteil des

Wassers in Städten der Antike verloren, weil selbst in sonst gut eingerichteten Häusern Roms Absperrschieber und Wasserhähne eine Seltenheit waren. Beispielsweise wurde in Pompeji eine Heißwasser-Heizungsanlage ausgegraben, die über Wasserhähne verfügte. Eine solche Einrichtung dürfte aber ein Luxus gewesen sein.

In anderen Teilen des Römischen Reiches, vor allem auf dem Gebiet des heutigen Deutschland, Frankreich und Großbritannien, wurde Wasser oft in Leitungen aus Holz transportiert.

