

**Aus Misserfolgen lernen** Nur wenige Innovationen schaffen es zum Erfolg. Das Scheitern ist der Regelfall  
**Nichts währet ewiglich** Wissenschaft müht sich oft jahrhundertlang durch Irrtümer und Niederlagen  
**Hilfe! Die Erde schrumpft?** Die Anhänger der Kontraktionstheorie glaubten, dass die Erde immer kleiner wird

# KULTUR & TECHNIK

## Erfolgreich scheitern

Fehler, Irrtümer und Misserfolge  
begleiten unser Streben nach Erkenntnis



SEIT 1954  
MAßGEFERTIGT  
IN DEUTSCHLAND



müller maßmanufaktur  
*ganz ihre linie*

[muellermassmanufaktur.de](http://muellermassmanufaktur.de)

**MABCENTER MÜNCHEN**  
Maximiliansplatz 17 | München  
Mo-Fr 10.00 - 18.30 Sa 10.00 - 16.00



**Liebe Leserin,  
lieber Leser,**

keiner hat es treffender gesagt als Goethe: »Es irrt der Mensch, solange er strebt«, lässt er im Faust-Prolog Gott zu Mephisto sagen. Kein Streben ohne Irrtum. Kein Handeln ohne Fehler. Und manchmal kann ein offensichtliches Missgeschick auch zu ganz neuen Entdeckungen oder direkt ins Guinnessbuch der Rekorde führen. Ich erinnere mich immer noch gerne an meine Zeit im Labor meines Lehrers Gerd Binnig, Erfinder des Rastertunnelmikroskops. Ich bin mit der rastertunnelmikroskopischen Spitze zu nahe an die Oberfläche eines Kristalls gestoßen. Das war natürlich nicht beabsichtigt. Aber als ich genau hinsah, entdeckte ich, dass ich exakt ein Atom entfernt hatte. Im Guinnessbuch der Rekorde wurde das Ergebnis dieses Missgeschicks später als das kleinste Loch der Welt eingetragen. Aber dieses kleinste Loch kann noch viel mehr: Denn wir haben damit gezeigt, dass es heute möglich ist, mit einzelnen Atomen zu bauen. Man kann also z. B. ein atomares Bit schreiben. Aus reinem Zufall machten wir damals diese Entdeckung. Viele große Erfindungen sind Ergebnisse solcher Zufälle: Das Penicillin, die Teflonpfanne, ja sogar die kosmische Hintergrundstrahlung um nur einige der bekanntesten zu nennen. Die Voraussetzung, dass diese Entdeckungen gemacht werden konnten war, dass die Wissenschaftler oder Erfinder gedanklich flexibel und offen waren, um diese Geschenke des Zufalls anzunehmen.

Keiner setzt sich einfach hin und erfindet einfach so das erste Auto, auch wenn uns das in unserer von Erfolg zu Erfolg jagenden medialen Welt oft so suggeriert wird. Irrtümer, Fehler und Scheitern sind Ansporn für den Fortschritt. Christian Sicka fordert in seinem Beitrag, dass wir auch die »Antihelden« der Wissenschaft würdigen sollten, denn ohne ihre Irrtümer hätte es die Richtigstellungen kaum gegeben: Die falschen Erklärungen müssen existieren, damit die richtigen überhaupt auf den Markt kommen können.

Mit diesem Heft rücken wir im weitesten Sinn »gescheiterte« Ideen, Erfindungen und Projekte in den Fokus. Wir wollen damit auch daran erinnern, dass nicht die Erfolgsmeldung Movens wissenschaftlichen Forschens sein darf, sondern vor allem der Zweifel an dem, was gerade als unumstößliche Wahrheit gilt.

Es grüßt Sie herzlich

Ihr Wolfgang M. Heckl  
Generaldirektor

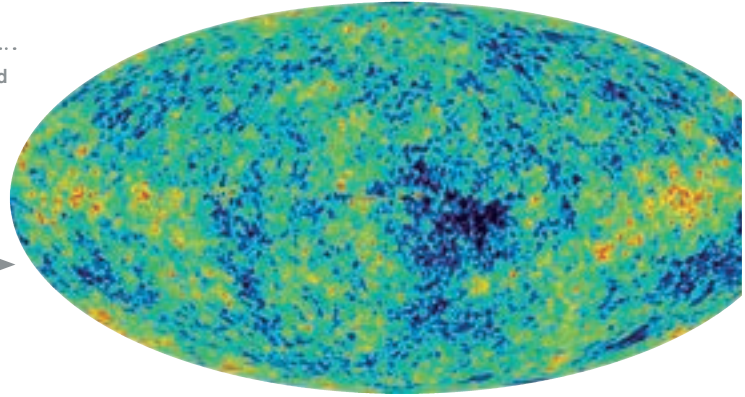


6

Die meisten technischen und wissenschaftlichen Projekte scheitern. Vergebens ist das nicht.

12

Viele große Entdeckungen sind Ergebnis von Zufällen und Irrtümern.



20

So ärgerlich es für den Betroffenen sein mag: Das Gehirn lernt aus Fehlern, wie es besser geht.

26

Mit der Phlogistontheorie wollte man naturwissenschaftliche Phänomene erklären.



32

Warum ist die Erde schrumpelig und nicht glatt? Die Kontraktionstheoretiker glaubten, die richtige Erklärung dafür zu haben.

38

Um Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie zu bestätigen, reiste ein deutsches Forscherteam 2014 zum Finsternispfad einer totalen Sonnenfinsternis in Norwegen.



44

Das Segel ist einer der umweltfreundlichsten Antriebe. Höchste Zeit für eine Wiederentdeckung.



56

Mit wenig Platz zum Starten und Landen sollten Senkrechtstarter auskommen.

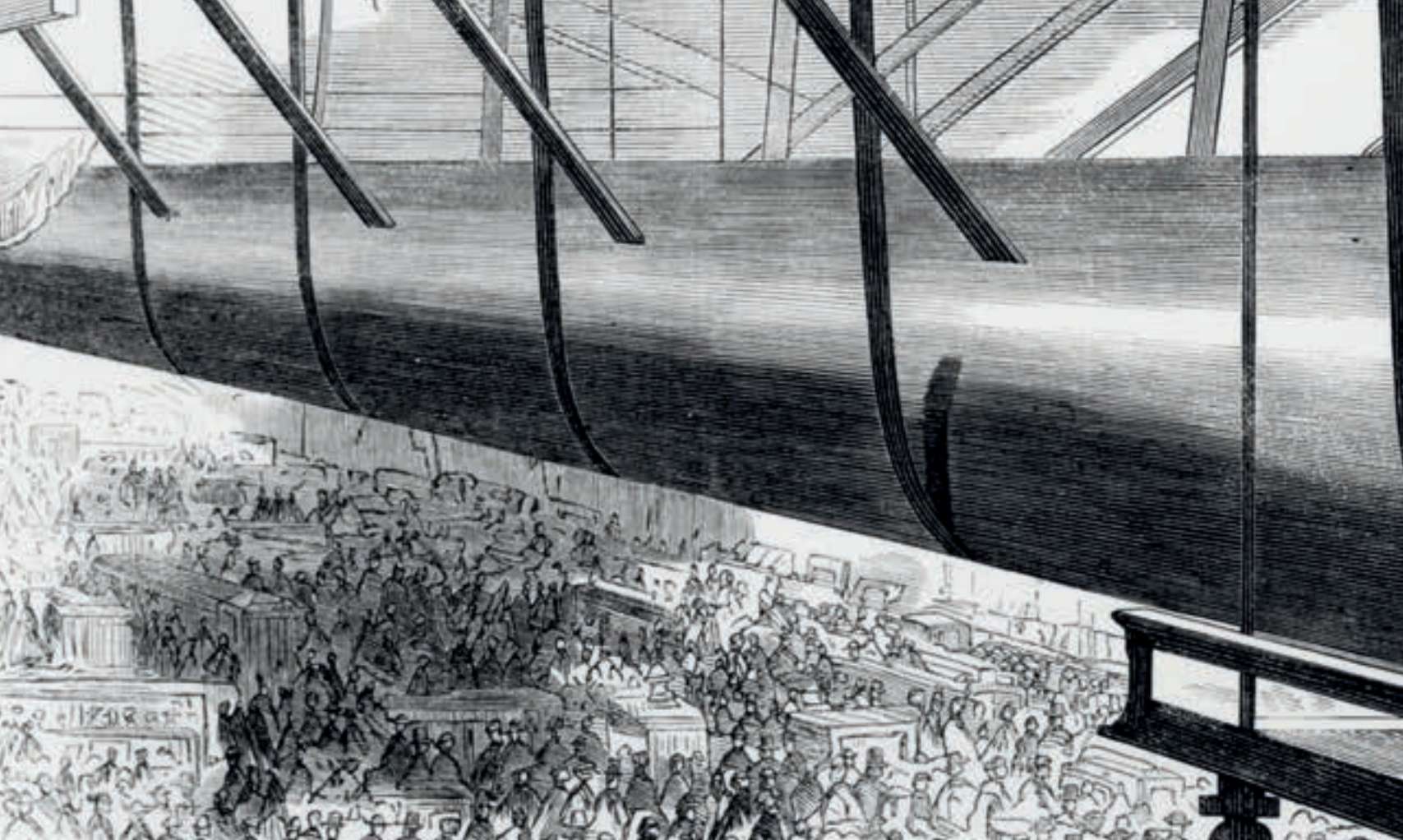


**ERFOLGREICH SCHEITERN**

- 6**    **Aus Misserfolgen lernen**  
Innovatorisches Scheitern ist der Regelfall | **Von Reinhold Bauer**
- 12**   **Nichts währet ewiglich**  
Wissenschaft tastet sich suchend durch Irrtümer | **Von Christian Sicka**
- 20**   **Alles unter Kontrolle**  
Wie unser Gehirn Fehler verarbeitet | **Von Markus Ullsperger**
- 26**   **Der Feuerstoff**  
Die Theorie des Phlogiston | **Von Susanne Rehn-Taube**
- 32**   **Hilfe! Die Erde schrumpft?**  
Die Kontraktionstheorie und Alfred Wegener | **Von Frank Holzförster**
- 38**   **Der Saum der Finsternis**  
Eine missglückte Reise im Jahr 2014 | **Von Gerhard Hartl**
- 44**   **Windkraft für den Klimaschutz**  
Technik von gestern kann Probleme von heute lösen | **Von Jobst Broelmann**
- 50**   **Direkt gegen den Wind**  
Über Niederlagen zum Weltmarktführer | **Von Jörn Bohlmann**
- 56**   **Ende eines Höhenflugs**  
Die Geschichte der Senkrechtstarter | **Von Phillip Berg**
- 

**STANDARD**

- 3**    **Editorial**
- 35**   **MikroMakro**  
Die Seiten für junge Leser
- 60**   **Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum**  
Bildung – ein zentrales Anliegen | **Von Monika Czernin**
- 62**   **Innenansichten**  
Neues aus dem Deutschen Museum
- 64**   **Schlusspunkt**
- 66**   **Vorschau, Impressum**



# Aus Misserfolgen lernen

*Innovatorisches Scheitern, nicht innovatorischer Erfolg, ist der Regelfall! Das jedenfalls ist das Ergebnis von Untersuchungen, die sich darum bemühen, die Erfolgsquote von Innovationsprozessen zu messen. Mit einiger Regelmäßigkeit kommt dabei heraus, dass je nach Innovationstypus und je nach Branche zwischen 60 und 90 Prozent aller Vorhaben scheitern.*

Von Reinhold Bauer

**S**o wenig an diesen Ergebnissen im Grundsatz zu zweifeln ist, so schwierig ist es, im Detail wirklich belastbare Zahlen zum Phänomen des Scheiterns zu ermitteln. Über ihre Misserfolge geben Unternehmen nämlich in aller Regel nur äußerst ungern Auskunft, an verlässliche Informationen ist also nur schwer zu gelangen oder – anders ausgedrückt – das Thema Scheitern ist bis heute hochgradig tabuisiert.

Damit ist dann auch schon ein Grund dafür genannt, dass der innovatorische Misserfolg vergleichsweise schlecht erforscht ist. Ein zweiter Grund für diese partielle Blindheit gegenüber dem Scheitern liegt wohl darin, dass der Begriff »Innovation« häufig immer noch ausschließlich mit »Fortschritt« und »Erfolg« gleichgesetzt wird. Diese uneingeschränkt positive Interpretation von Innovationen ignoriert aber die Risiken des Innovationsprozesses und sie ignoriert auch, dass selbst erfolgreiche Innovationen

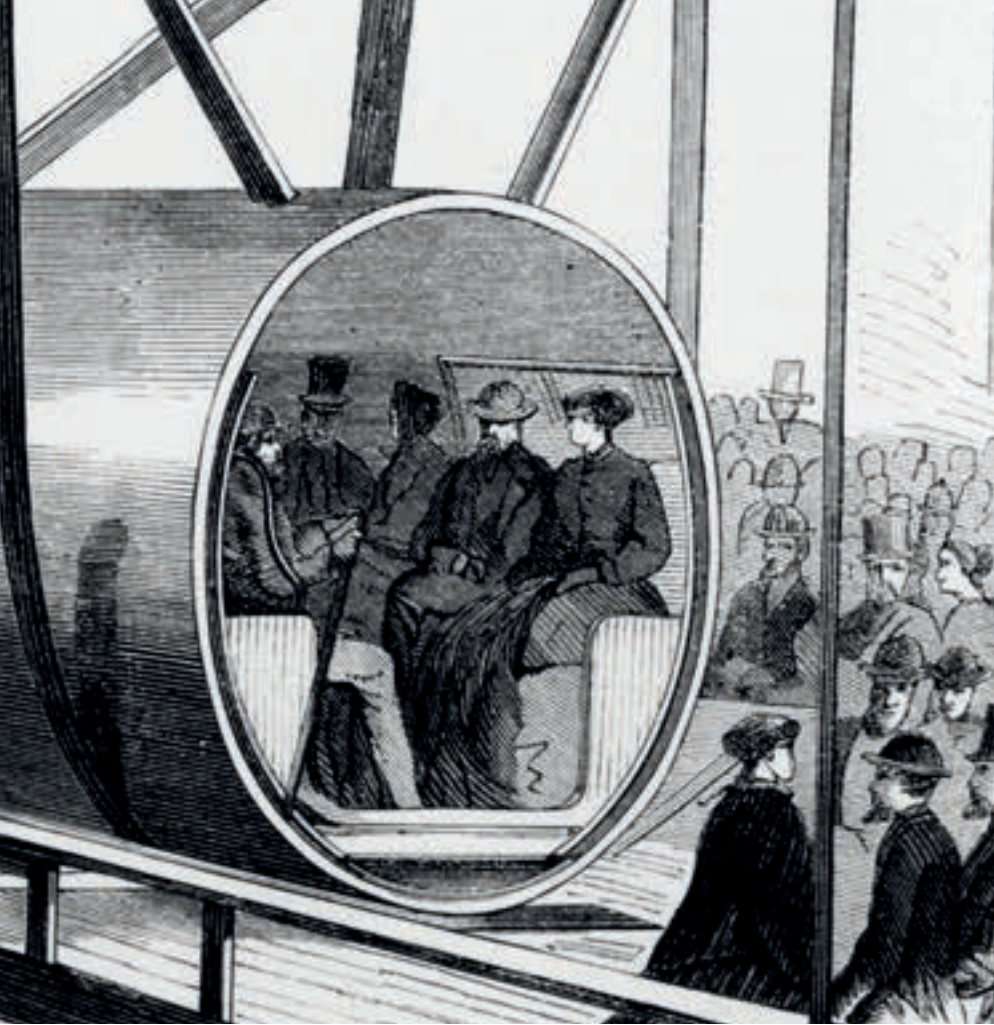


Der Transrapid galt lange als Vorzeigeprojekt zur Optimierung des öffentlichen Verkehrs. Im Jahr 2010 kam das vorläufige Aus für die Magnetschwebbahn. Hier eine Simulation vor den Münchner Frauentürmen.

keinesfalls immer und für alle Betroffenen durchgehend positive Ergebnisse haben müssen. Unter dem Einfluss einer solch verzerrten Wahrnehmung drohen aber die tatsächlichen Bedingungen für innovatives Handeln und die dabei eben stets auch vorhandenen Risiken des Scheiterns aus dem Blick zu geraten.

Die hier vertretene These lautet nun, dass es sich lohnt, gerade das innovatorische Scheitern zu analysieren. Zum Ersten, weil sich auf dieser Basis Aussagen über charakteristische Gründe für innovatorische Fehlschläge formulieren lassen, sowie zum Zweiten, weil es die Auseinandersetzung mit dem Misserfolg erlaubt, eine andere Perspektive auf den historischen Prozess des technischen Wandels zu entwickeln.

Wenn im Folgenden von Innovationen die Rede ist, so sind damit planvolle, zielgerichtete Veränderungs- bzw. Entwicklungsprozesse gemeint, die zur erstmaligen wirt-



»Itera« lautete der Handelsname eines Plastikfahrrads, das in den 1980er Jahren auf den Markt kam. Nur drei Jahre nach Markteinführung musste die Produktion mangels Nachfrage wieder eingestellt werden.



schaftlichen Verwertung einer neuen Problemlösung führen. Innovationen zeichnen sich durch ihre praktische Verwendung bzw. wirtschaftliche Verwertung aus. Erst durch diesen Verwertungsaspekt wird aus einer Erfindung, also einer Invention, tatsächlich eine Innovation.

Erfolgreich ist eine Innovation definitionsgemäß dann, wenn es durch ihre wirtschaftliche Verwertung gelingt, mindestens die entstandenen Entwicklungs- bzw. Innovationskosten wieder zu erwirtschaften. Bei einer gescheiterten Innovation bzw., korrekter formuliert, einem gescheiterten Innovationsversuch, misslingt hingegen die wirtschaftliche Verwertung in diesem Sinne. Salopp formuliert: Ein notwendiges Merkmal der gescheiterten Innovation ist, dass sie es bis in die Wirklichkeit hinein geschafft hat, ein zweites, dass sie diese wieder verlassen hat, ohne das investierte Kapital hereinzuspielen.

Mit dieser Definition von »Flop« öffnet sich ein außerordentlich breites Forschungsfeld: Der Friedhof gescheiterter Innovationen ist nämlich zum Bersten voll! Er beheimatet beispielsweise die Unterdruck-Eisenbahnen des frühen 19. Jahrhunderts ebenso wie verschiedenste Kabinenbahnsysteme der 1970er Jahre. Wir stoßen auf eine Reihe von Exoten wie etwa ein in den frühen 1980er Jahren auf den Markt gebrachtes Plastikfahrrad mit dem eigentümlichen Namen »Itera« oder auch auf zeittypische, längst verschwundene Technologien wie die Dampfturbinen-Lokomotiven der 1920er Jahre. Sollten Sie von keinem dieser Beispiele bisher gehört haben, so ist das kein Grund zur Sorge: Fast niemand erinnert sich mehr an diese Innovationsversuche, da nämlich gescheiterte Vorhaben

Bereits 1667 beschrieb Denis Papin die Möglichkeit, Gegenstände mittels Druckluft durch Rohre zu transportieren. Ab 1810 gab es erste Eisenbahnen, die mit Druckluft angetrieben wurden. Und 1863 transportierte eine kleine pneumatische Eisenbahn Pakete und Post durch London. Der Transport von Menschen in pneumatischen Zügen konnte sich jedoch nicht durchsetzen.

in aller Regel über kurz oder lang von der Welt vergessen werden. In Erinnerung sind bestenfalls die angesichts verlorener Subventionsmillionen spektakuläreren Fälle, etwa das in den 1980er Jahren aufsehenerregende Riesenwindrad Growian oder die erst in jüngerer Zeit gescheiterte Magnetschwebbahn Transrapid.

Fragt man nach den Ursachen für innovatorisches Scheitern, so wird rasch deutlich, dass der Misserfolg selten monokausal erklärt werden kann. Innovationsversuche scheitern vielmehr an ganzen Problembündeln. Bemüht man sich allerdings, diese Problembündel zu entflechten und die erkennbaren Problemstränge unterschiedlichen Kategorien zuzuordnen, so zeigen sich gewisse Regelmäßigkeiten und sich wiederholende Muster. Mindestens fünf signifikante Schwerpunkte sind zu erkennen, also Idealtypen des Scheiterns, die im Folgenden in Form einer »Typologie des Scheiterns« präsentiert werden sollen.

### Typ 1: Innovationsversuche, die an technischen Problemen scheitern.

Nicht eben erstaunlich ist wohl die Feststellung, dass in einem engeren Sinne technische Probleme für das Scheitern einer Reihe von Innovationsversuchen zumindest mitverantwortlich waren. Die Neuerungen zeigten also nicht die von ihren Entwicklern oder ihren potenziellen Nutzerinnen und Nutzern erwarteten oder gewünschten Eigenschaften, was zu einer Einstellung bzw. eben zum Scheitern der Innovationsvorhaben führte. Beispiele für Innovationsvorhaben, die auch an technischen Problemen scheiterten, finden sich erwartungsgemäß viele. Bei



Der Name war Programm: Growian hieß das Riesenwindrad, das in den 1980er Jahren für Furore sorgte. Neben technischen Problemen scheiterte die Anlage wohl auch daran, dass einige Akteure mit dem Scheitern des Projekts nachweisen wollten, dass die Windenergie sich nicht zur Stromerzeugung nutzen lässt.

den bereits erwähnten Dampfturbinen-Lokomotiven der Zwischenkriegszeit waren es etwa häufige Lagerschäden und deren konstruktionsbedingt enorm hoher Dampfverbrauch, die in der Praxis zu Problemen führten. Der sehr viel bekanntere Pkw-Wankelmotor krankte auch an seinem konstruktionsbedingt hohen Benzin- und Ölkonsum und den vergleichsweise schlechten Abgaswerten. Und um wenigstens ein drittes Beispiel zu bringen, so verhinderten beim 1987 stillgelegten Riesenwindrad Growian ständige Überlastschäden einen kontinuierlichen Betrieb.

Bei allen Beispielen blieb aber umstritten, wie relevant die rein technischen Probleme für das letztendliche Scheitern der Innovationsversuche tatsächlich waren und welche anderen Faktoren möglicherweise eine Rolle spielten. Zu fragen ist zudem immer danach, warum die entsprechenden Projekte trotz absehbarer technischer Probleme überhaupt in Angriff genommen wurden, warum also die Innovatoren auf die Idee kamen, etwa eine Dampflokomotive mit Turbinenantrieb, eine Alternative zum konventionellen Hubkolbenmotor oder eine neue Windkraftanlage zu entwickeln. Um darauf eine Antwort zu finden, sind dann mitunter deutlich komplexere ökonomische, politische und mitunter auch kulturelle Rahmenbedingungen zu berücksichtigen: Die Entwicklung der Dampfturbinen-Lokomotiven ist beispielsweise ohne die für die Zwischenkriegszeit typische Geschwindigkeitsbegeisterung kaum zu verstehen, die Faszination durch den Wankelmotor hatte

auch damit zu tun, dass es sich um eine »schöne« Maschine handelte, die anders als die konventionellen Hubkolbenmotoren unmittelbar eine Drehbewegung zu erzeugen vermochte und die Growian-Anlage ist selbstverständlich ohne die sich in den 1970er Jahren formierende Umweltbewegung und die aufkommende Diskussion um alternative Energien nicht zu erklären. Eine Besonderheit beim Windrad Growian ergibt sich außerdem aus dem Wunsch einiger Akteure, mit Hilfe der Anlage zu beweisen, dass die Nutzung von Windenergie zur Stromerzeugung eben gerade nicht funktioniert. Insofern ist dieser Innovationsversuch durchaus »erfolgreich gescheitert«.

## Typ 2: Innovationsversuche, die aufgrund der spezifischen Konkurrenzsituation scheitern.

Weitgehend erwartungskonform dürfte auch die Feststellung sein, dass die jeweilige Konkurrenzsituation von maßgeblicher Bedeutung für Erfolg oder Scheitern einer Neuerung ist. Viele Innovationsversuche scheiterten aufgrund »überlegener« Konkurrenz, sei es, dass diese bereits erfolgreich am Markt präsent war, dass alte Techniken in Reaktion auf die neue Herausforderung weiterentwickelt wurden oder dass andere neue Techniken den erhofften Erfolg vereitelten.

Das galt etwa gleich für ein ganzes Cluster neuer, vermeintlich verbrauchsgünstiger und umweltverträglicher alternativer Kraftfahrzeugantriebe, deren Entwicklung in Reaktion auf die Ölpreiskrisen und die bereits erwähnte Umweltbewegung der 1970er Jahre in Angriff genommen wurde. Diese alternativen Antriebe erreichten ihre Marktreife erst zu einem Zeitpunkt, als unter dem Einfluss der gleichen Rahmenbedingungen bereits weiterentwickelte konventionelle Hubkolbenmotoren in Kombination mit geregelten Abgaskatalysatoren eingeführt worden waren. Es bestand insofern kein Interesse mehr an der tatsächlichen Produktionsaufnahme der alternativen Technologien, sei es nun der Schichtladungs-, der Mager- oder der Pkw-Stirlingmotor.

Häufig wiederum alles andere als trivial ist es herauszufinden, worin denn eigentlich genau die Überlegenheit der konkurrierenden Technik besteht. »Harte Faktoren« wie etwa niedrigere Kosten oder bessere technische Leis-



tungsdaten spielen hier natürlich eine wichtige Rolle. Nicht minder entscheidend können allerdings Faktoren wie größere Marktmacht der Konkurrenz, aufwendigere Werbung und PR-Arbeit, bessere Kundenbetreuung oder – generell – höhere Konformität mit dem gegebenen Nutzungsumfeld sein. »Überlegenheit« kann mitunter aber auch auf den politischen und wirtschaftspolitischen Einfluss der etablierten Konkurrenten zurückzuführen sein. Dazu ein wenig bekanntes Beispiel: In den späten 1930er, frühen 1940er Jahren versprach ein neues Binnenschiff-fahrts-Transportsystem, das sogenannte Lastrohrfloß, ein geradezu revolutionäres Potenzial für die Rationalisierung der Binnenschifffahrt. Es handelte sich um ein System, das Eigenschaften später sehr erfolgreicher Innovationen vorwegnahm, nämlich solche der späteren Schubschiffe und auch solche des Containerverkehrs. Das Lastrohrfloß scheiterte letztlich auch am vehementen Widerstand des zum Einführungszeitpunkt mächtigen staatlichen Reichsschleppdienstes, also der Betreibergesellschaft von Schleppdampfern, die aufgrund der neuen Technologie überflüssig zu werden drohten. Man legte dem Lastrohrfloß zahlreiche nicht zuletzt administrative Hürden in den Weg und versuchte damit, das Projekt zu torpedieren. Wir erkennen hier ein für potenzielle »Opfer« neuer Technologien durchaus typisches Verhalten.

### Typ 3: Innovationsversuche, die aufgrund einer Fehleinschätzung der potenziellen Nutzer scheitern.

Ein offenbar entscheidender Punkt für die Erfolgsaussichten einer Innovation ist die möglichst enge Verbindung zwischen Innovator und potenziellen Nutzern. Fehlt das Verständnis für Nutzererwartungen oder auch -fähigkeiten, droht der Innovationsversuch an fehlender Akzeptanz auf Seiten der potenziellen Nutzer zu scheitern. Ein mögliches Beispiel dafür ist etwa das bereits erwähnte, Anfang der 1980er Jahre von Volvo-Ingenieuren entwickelte Itera-Kunststofffahrrad. Das leichte, solide und in der Fertigung preiswerte Rad scheiterte nicht zuletzt daran, dass es von seinen möglichen Nutzern als klobig und hässlich empfunden wurde. Es zeigte so gar nicht das Design, das Nutzer in dieser Zeit von einem futuristischen Rad erwar-



Bereits 1924 hatte Felix Wankel mit der Entwicklung seines Kreiskolbenmotors begonnen. Erstmals eingesetzt wurde er in den 1960er Jahren im NSU Spider. Trotz des anfänglichen Hypes konnte sich allerdings der Wankelmotor als Automobilantrieb dauerhaft nicht durchsetzen.

teten. Darüber hinaus kam es zu einem Zeitpunkt auf den Markt, als die erste große Fahrradwelle in Westeuropa, die sich Ende der 1970er Jahre formiert hatte, bereits wieder am Abklingen war. Im Endeffekt wollte fast niemand das hässliche Rad haben, so »modern« es möglicherweise auch sein mochte.

### Typ 4: Innovationsversuche, die aufgrund eines zu hohen »Neuheitsgrads« scheitern.

Der »Neuheitsgrad« oder auch die »Radikalität« einer Innovation darf nicht zu groß sein, da ansonsten die Gefahr besteht, dass diese Innovation übermäßig hohe Anpassungsleistungen erforderlich macht. Bei zu großer Radikalität passt die neue Technologie oft nicht in die herrschende Produktions-, Produkt- oder Verwendungskultur, d. h. ihre Herstellung, Verbreitung oder Nutzung erfordert zu aufwendige technische, mentale oder auch soziale Veränderungen. Anders ausgedrückt: Die Anpassungskosten – ob nun im wörtlichen oder übertragenen Sinne – sind zu hoch. Nicht zuletzt an diesem Problem scheiterte zum Beispiel vor gut 15 Jahren der erste Versuch, E-Books zu vermarkten: Damals schien die neue Form des Lesens zu weit entfernt von den etablierten Nutzungsroutinen im Umgang mit Büchern. Zu wenige Nutzerinnen und Nutzer waren zur erforderlichen Umstellung bereit. Dass das E-Book inzwischen in einem zweiten Anlauf erfolgreich zu werden scheint, zeigt, dass sich mit dem kulturellen Wandel, hier etwa durch zunehmende Digitalisierung, auch die Erfolgsaussichten von Innovationen verbessern können und zeigt im Übrigen auch, dass Aussagen zu innovatorischem Scheitern immer nur Aussagen von zeitlich begrenzter Reichweite sind.

Besonders groß ist die Gefahr, am Problem der übermäßigen Radikalität zu scheitern, bei Innovationen, die in ein bereits vorhandenes System integriert werden müssen oder aber mit diesem konkurrieren. Die relative Vorteilhaftigkeit einer Innovation muss hier sehr ausgeprägt sein, damit überhaupt Aussicht auf Erfolg besteht. An dieser Stelle wäre etwa auf die in der Bundesrepublik hochaktuelle und auch politisch gewollte Entwicklung in Richtung Elektromobilität zu verweisen. Die Pfadentscheidung zugunsten der Elektromobilität erlaubt es zwar, sehr kon-



Durch Zufall erfand Percy Spencer 1946 die Mikrowelle. Die ersten Geräte waren für den Hausgebrauch jedoch viel zu groß und schwer. Erst ab den 1960er Jahren fand die Mikrowelle Eingang in die Haushaltsküchen.

krete Antworten auf eine sehr komplexe Frage zu geben, nämlich auf die Frage nach der Zukunft unseres Mobilitätssystems und unserer Mobilitätsgewohnheiten unter den Bedingungen von Klimawandel und endlichen Erdölreserven. Innerhalb des nach wie vor dominierenden und nach wie vor im Grunde auch recht gut funktionierenden etablierten Verkehrssystems, das von Automobilen mit Verbrennungskraftmaschinen dominiert wird, erscheint aber den potenziellen Nutzern und Nutzerinnen die relative Vorteilhaftigkeit des Elektromobils zurzeit wohl noch als zu gering. Selbst Steuererleichterungen und Prämien vermögen daher nur sehr bedingt zum Kauf eines Elektrofahrzeugs zu motivieren. Das Projekt Elektromobilität droht insofern, mindestens was die selbst gesetzten Ziele anbelangt, erst einmal zu scheitern.

#### **Typ 5: Innovationsversuche, die aufgrund eines instabilen Entwicklungsumfeldes scheitern.**

Um bis zur Markteinführung und auch über diese hinaus erfolgreich umgesetzt werden zu können, sind Innovationsversuche auf ein in mehrfacher Hinsicht stabiles Umfeld, einen stabilen »Entwicklungsraum« angewiesen. Eine möglichst hohe Stabilität bzw. Vorhersehbarkeit sollte bei der Zusammensetzung des »Kernpersonals«, bei den grundsätzlichen Entwicklungszielen, naheliegenderweise beim Entwicklungsbudget sowie beim beteiligten Entwicklungsnetzwerk (z.B. Auftraggeber, entwickelnde Firmen oder Abteilungen, ggf. beteiligte staatliche Stellen usw.) gegeben sein. Eine schwankende oder sprunghafte Innovations- bzw. Interventionspolitik, übermäßige Konkurrenz zwischen verschiedenen Projekten innerhalb des

Entwicklungsnetzwerks, Misstrauen zwischen Firmenleitung und Entwicklungsabteilung oder auch Rivalität zwischen verschiedenen Abteilungen können zur massiven Gefährdung bzw. letztlich zum Scheitern eines Innovationsvorhabens führen.

Diese Feststellung führt noch zu einem weiteren Problem, das man als »Abschottungsproblem« bezeichnen könnte. Bei Entwicklungsvorhaben besteht immer auch die Gefahr, dass das Nutzungsumfeld, für das die Innovation ursprünglich gedacht war, sich bis zum tatsächlichen Markteintritt wieder erheblich verändert. Aufgrund der Tatsache, dass Modifikationen des Innovationsvorhabens die Entwicklungsarbeit erschweren und auch, weil bei den Entwicklern mitunter eine gewisse »Betriebsblindheit« entsteht, droht die eigentlich erforderliche Anpassung des Projekts an sich verändernde Rahmenbedingungen zu unterbleiben. Der Erfolg des Vorhabens gerät damit in Gefahr. Dieses Problem zeigt sich bei nicht wenigen Innovationsvorhaben, so etwa auch bei den eben bereits erwähnten neuen Kraftfahrzeugantrieben der 1970er Jahre. Ein geradezu klassisches Beispiel für dieses Phänomen scheint auch der Transrapid zu sein: Als eine im Wesentlichen in den 1960er Jahren konzeptualisierte Technologie zielte er auf eine damals vorhandene Nische im öffentlichen Fernverkehrsangebot, nämlich zwischen der Bahn, die bis zu einer Entfernungen von etwa 200 Kilometern kommod zu benutzen war, und dem Flugzeug, dessen Nutzung vergleichsweise teuer war und erst ab etwa 600 Kilometern sinnvoll zu sein schien. Bei seiner versuchten Implementierung Ende des 20. Jahrhunderts war jedoch diese Lücke aufgrund einer markanten Geschwindigkeitssteigerung im Bahn-Fernverkehr und deutlich sinkenden Nutzungskosten im Flugverkehr längst verschwunden. Allgemein ausgedrückt: Unter den Bedingungen von beispielsweise subventionsbedingter Abschottung steigt die Gefahr, dass ein Innovationsvorhaben Antworten auf Fragen hervorbringt, die niemand (mehr) stellt oder – anders formuliert – eine Technologie entsteht, die außerhalb des Entwicklungsraumes niemand (mehr) will.

Was bereits deutlich geworden sein dürfte ist, dass gleichsam typisierungsübergreifend dem Innovationszeitpunkt eine zentrale Bedeutung für den Erfolg oder Misser-

folg eines Innovationsversuchs zukommt. Bei der Beschäftigung mit gescheiterten Innovationen spielen Probleme aufgrund eines ungünstigen Timings, eines ungünstig gewählten »Zeitfensters« stets eine wichtige Rolle. Zeittypische Rahmenbedingungen ökonomischer, gesellschaftlicher oder politischer Natur können ebenso wie zeitlich befristete Trends oder Modererscheinungen über Erfolg oder Misserfolg einer Innovation entscheiden.

In diesem Zusammenhang sei noch einmal ausdrücklich betont, dass Aussagen über das Scheitern von Innovationen immer nur Aussagen mit »begrenzter Reichweite« sein können: Scheitern kann stets nur für einen bestimmten Zeitraum und einen bestimmten geografischen bzw. kulturellen Raum eindeutig diagnostiziert werden. Eine einmal gescheiterte Technologie kann also durchaus zu einem späteren Zeitpunkt oder in einem anderen Nutzungsumfeld sehr erfolgreich werden. Ein Beispiel dafür ist uns gerade schon in Form des E-Books begegnet, zwei weitere seien noch erwähnen. Da wäre zum ersten der Mikrowellenofen, dessen erster Markteinführungsversuch in den 1950er Jahren völlig gescheitert ist, der dann aber seit Mitte der 1970er Jahre hoch erfolgreich wurde. Unter den gesellschaftlichen Bedingungen der 1950er Jahre mit ihren überwiegend noch sehr traditionellen Familienstrukturen gab es schlicht keinen Bedarf für eine Rationalisierung des Kochens bzw. für die zeitliche Entkopplung von Speisenzubereitung und Verzehr. Es musste erst eine veränderte Welt voller Singlehaushalte und Doppelverdiener mit oder auch ohne Kinder entstehen, in der die freilich inzwischen auch technisch weiterentwickelte, zuverlässigere und preiswertere Mikrowelle erfolgreich werden konnte.

Als zweites Beispiel sei die Bildtelefonie erwähnt, deren Ersteinführungsversuch unter dem Namen »Picturephone« durch den US-amerikanischen Telekommunikationskonzern AT&T Anfang der 1970er Jahre gewaltig floppte. Hier war der Misserfolg nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass das Bildtelefon von seinen potenziellen privaten Nutzern als »übergriffiges« Medium empfunden wurde. Es eröffnete Anrufern im wahrsten Sinne des Wortes Einblicke in die Privatsphäre der Gesprächspartner, die diese bei vielen Gelegenheiten eben nicht zu gewähren bereit waren. Bekanntlich hat sich die Bildtelefonie inzwischen auf Ba-



In den 1970er Jahren brachte der amerikanische Konzern AT&T das »Picturephone« auf den Markt. Doch das innovative Bildtelefon erwies sich als Ladenhüter, da es als unerwünschter Eingriff in die Privatsphäre empfunden wurde.



DER AUTOR

**Prof. Dr. Reinhold Bauer** lehrt am Historischen Institut der Universität Stuttgart Wirkungsgeschichte der Technik. Er hat zahlreiche Bücher und Aufsätze zur Innovationsgeschichte verfasst.

sis des Internets und auch vor dem Hintergrund massiv veränderter Vorstellungen von Privatheit und Privatsphäre durchaus erfolgreich etabliert. Zum Massenkommunikationssystem ist sie allerdings bisher immer noch nicht angestiegen.

Was nun die vorgestellte Typologie des Scheiterns angeht, so ist offensichtlich, dass die zusammengestellten fünf Idealtypen fast niemals in Reinform vorkommen. Zudem existieren Überschneidungen zwischen den Typen selbst, etwa wenn sich aus einer Fehleinschätzung von Nutzererwartungen eine unzureichende Konkurrenzfähigkeit ergibt. Zielkonflikte können zudem zu Widersprüchen zwischen einzelnen Forderungen führen, etwa der nach Anpassung der Projekte an sich verändernde Rahmenbedingungen und der nach einem möglichst stabilen »Entwicklungsraum«. Trotz dieser inneren Spannungen kann die vorgestellte Typisierung aber die Hintergründe des Scheiterns deutlicher machen. Sie lässt Gemeinsamkeiten erkennen, die bei einer rein summarischen Zusammenstellung von Fallbeispielen unsichtbar bleiben würden.

Was aber bringt die Analyse des Scheiterns dem (Technik-)Historiker? Die Auseinandersetzung mit dem innovatorischen Scheitern bietet die Chance, den Charakter technischen Wandels klarer zu akzentuieren. Deutlich wird dabei, dass es einen vermeintlich geraden, rationalen Pfad, dem die technische Entwicklung aus der Vergangenheit in die Gegenwart gefolgt ist, tatsächlich nie gegeben hat. Die Vorstellung, objektive technikwissenschaftliche Kriterien oder auch die ökonomische Rationalität würden garantieren, dass sich stets die in welchem Sinne auch immer »beste« Technik durchsetzt, muss als reiner Mythos zurückgewiesen werden.

Es wird deutlich, dass die Entwicklung neuer Technologien – ob letztlich erfolgreich oder nicht – immer auf Handeln unter Informationsmangel, unter unklaren Bedingungen beruht. Unsicherheiten sind angesichts dieser unklaren Bedingungen »endemisch«, das Risiko des Scheiterns ist also immer gegeben. Bei erfolgreichen Innovationen droht der Erfolg selbst den Blick auf diese unvermeidbaren Entstehungsbedingungen zu verstellen. Gerade dieser Hintergrund macht aber verständlich, dass eben das Scheitern und nicht der Erfolg der Regelfall ist. ■



# Nichts währet ewiglich

*Naturwissenschaftliche Erkenntnisse werden gerne als unumstößliche Wahrheiten »verkauft«. Dabei tastet sich die Wissenschaft oft jahrhundertlang durch Irrtümer – ehe sie zu fundamentalen Einsichten gelangt. Wie lange deren Halbwertszeit beträgt, werden künftige Generationen erzählen. Von Christian Sicka*

**W**aren sie letzten Sonntag in der Kirche? Oder an Weihnachten, oder Ostern? Vielleicht haben Sie das *Glaubensbekenntnis* gesprochen »...Ich glaube an den Heiligen Geist, die heilige katholische Kirche, Gemeinschaft der Heiligen, Vergebung der Sünden, Auferstehung der Toten und das ewige Leben. Amen.« Oder das *Vaterunser*: »... Denn Dein ist das Reich und die Kraft und die Herrlichkeit in Ewigkeit. Amen.«

»Ewigkeit« – diesem großen Begriff steht unser Gehirn irgendwie machtlos gegenüber. Also besser nicht darüber nachdenken – es gibt eben Dinge, die übersteigen unser Denkvermögen. Basta. Viele von uns haben sich an den Themen und Fragen, die mit Unendlichkeiten zu tun haben, in ihrer Jugend abgearbeitet und sie später erleichtert beiseite gelegt – erscheint die Beschäftigung damit doch reichlich unergiebig.

Doch es gibt Wissenschaftler, die sich täglich mit Unendlichkeiten herumschlagen (möglicherweise, weil sie in ihrer Kindheit stecken geblieben sind). Vor allem die

Kosmologen gehören zu dieser seltenen Spezies: Wenn man sich mit dem größten Ganzen, dem Universum auseinandersetzt, kommt man gar nicht darum herum, sich mit diesen Fragen zu beschäftigen. Denn: Erstens ist nicht klar, ob es ein größtes Ganzes überhaupt gibt oder ob der Raum sich ins Unendliche erstreckt und zweitens stellt sich natürlich die Frage, ob unser Universum schon immer da war und immer da sein wird oder ob das Ganze einen Anfang und ein Ende hat oder nur eines von beiden.

### Die Idee vom großen Knall

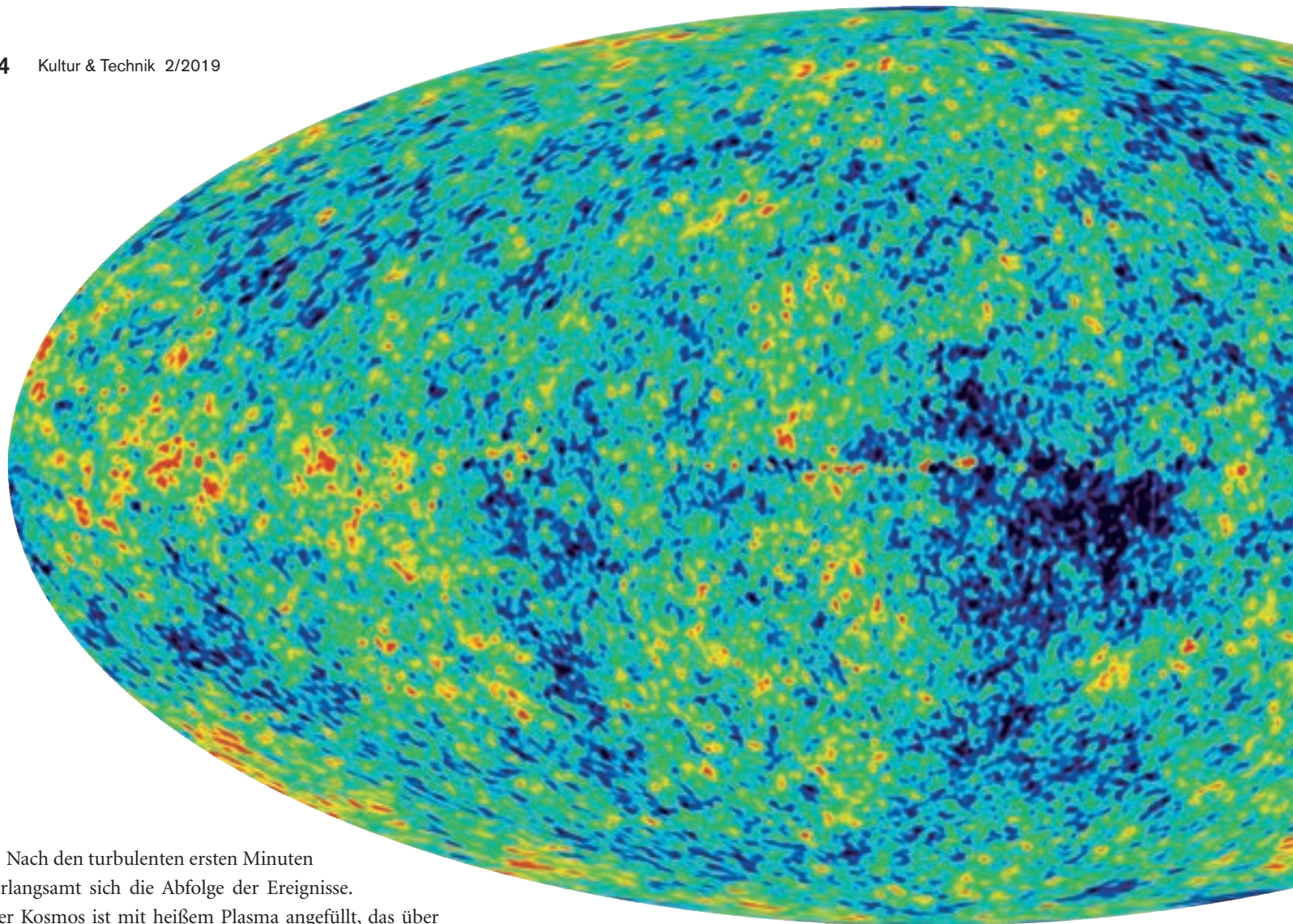
Mitte des letzten Jahrhunderts hat man die Kosmologie noch kaum zu den Naturwissenschaften gezählt, es gab einfach zu wenig und zu unsichere Beobachtungen. Heute hat sich diese Situation gänzlich geändert: Die Kosmologie ist zu einer Wissenschaft geworden, in die große Summen an Forschungsgeldern investiert werden. Wie die Teile eines Puzzles haben die Wissenschaftler Einzelbeobachtungen zu einem schlüssigen Modell von der Entstehung des Universums zusammengefügt – dem Standardmodell der Kosmologie. Trotz der offenen Fragen, die dieses Modell noch aufwirft, sehen viele Forscher in dem sogenannten Big-Bang-Modell eine Perle der Wissenschaft und manche

sprechen bereits vom Zeitalter der Präzisionskosmologie. Sie sind der Meinung, dass wir die Parameter des Big-Bang-Modells bereits bis auf wenige Prozent genau kennen. Für das Alter des Universums bedeutet das beispielsweise, dass sich der Zeitpunkt des Urknalls aufgrund genauerer Beobachtungen vielleicht noch um ein paar hundert Millionen Jahre verschiebt, was am großen Bild aber wenig ändert.

Grob beschrieben zeichnet das Big-Bang-Modell die Geschichte des Universums folgendermaßen nach: Mit dem Urknall (engl. »Big Bang«) entsteht das Universum. Über den Urknall selbst wissen wir nichts. Da sich das beobachtbare Universum ständig ausdehnt, muss es zu Beginn auf einen winzigen Raumbereich zusammengedrängt gewesen sein. Verfolgen wir den zeitlichen Ablauf der Entstehung des Universums zurück, so wachsen Temperatur und Dichte nahe am Urknall ins Unermessliche.

Hier endet der Gültigkeitsbereich aller bekannten physikalischen Theorien. Einen winzigen Bruchteil einer Sekunde ( $10^{-44}$  s) nach dem Urknall ist das Universum unvorstellbar dicht und heiß. Fremdartige Energiefelder enthalten winzige Unregelmäßigkeiten – sogenannte Quantenfluktuationen. Sie bilden die Keime für die heute größten sichtbaren Strukturen im Universum. Es folgt eine instabile Phase – Inflation genannt. Der gesamte heute sichtbare Kosmos hat am Ende dieser gigantischen Expansion jetzt etwa einen Meter Durchmesser. Danach expandiert der Raum weiter explosionsartig, wenn auch wesentlich langsamer als zuvor und die Temperatur sinkt rapide. Aus Energiefeldern der Anfangsphase entstehen subatomare Materieteilchen, darunter Quarks und Gluonen, aus denen die gewöhnliche Materie aufgebaut ist.

Ab dem Zeitpunkt der Entstehung dieser Teilchen ist die Physik, die wir auf den frühen Kosmos anwenden, im Labor nachprüfbar. 15 Sekunden nach dem Urknall enthält das junge Universum viel elektromagnetische Strahlung und eine geringe Menge an Materie. Sie bildet die Grundsubstanz für Sterne, Galaxien und biologisches Leben. Drei Minuten nach dem Urknall gleicht das Universum einem gigantischen Kernfusionsreaktor. Am Ende der Fusionskette besteht das Universum zu 75 Prozent aus Wasserstoff und zu 25 Prozent aus Helium mit geringen Spuren leichter Elemente.



Nach den turbulenten ersten Minuten verlangsamt sich die Abfolge der Ereignisse. Der Kosmos ist mit heißem Plasma angefüllt, das über die Jahrtausende langsam kälter wird. Nach 380 000 Jahren ist die Temperatur auf 2700 °C gefallen und es bilden sich stabile Atome. Die Strahlung kann sich danach frei ausbreiten – der Kosmos wird durchsichtig. Mit der Ausdehnung des Raumes wird auch die Wellenlänge des Lichts gedehnt und es wird dunkel.

Nach 200 Millionen Jahren hat die Gravitationskraft erkaltete Molekülwolken lokal zusammengezogen und komprimiert. Die so entstandenen ersten Sterne sind verglichen mit unserer Sonne um ein Vielfaches größer, heißer und massereicher. Im Großen sind die anfangs schwachen Massekonzentrationen der Dunklen Materie zu einem Netzwerk angewachsen. In den einzelnen Halos der Dunklen Materie sammelt sich die gewöhnliche Materie und bildet Milliarden von Sternen – das ist die Geburtsstunde der Galaxien. Aus der Asche der ersten Sterne entstehen in den Galaxien weitere Sternengenerationen. Im Lauf der Zeit verschmelzen benachbarte Galaxien zu immer größeren Galaxien, die sich ihrerseits zu Galaxienhaufen und Superhaufen vereinen. Vor 4,6 Milliarden Jahren, neun Milliarden Jahre nach dem Urknall, entsteht schließlich unsere Sonne als ein Stern der dritten Generation und mit ihr unser Heimatplanet – die Erde. Das Universum ist heute 13,6 Milliarden Jahre alt. Bis auf kleine warme Inseln um die vielen Sonnen ist es fast vollständig erkaltet. Wahrscheinlich kreisen um viele dieser Sonnen Planeten, auf denen sich Leben entwickeln konnte.

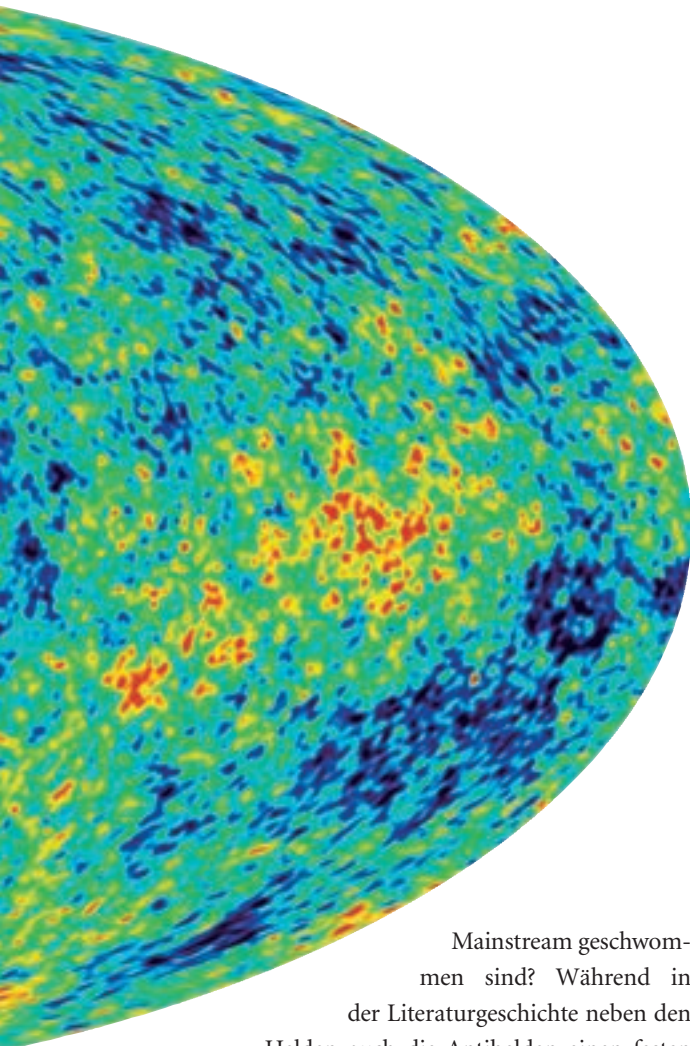
Zwischen 2009 bis 2013 kartierte der ESA-Satellit »Planck« die Temperaturunterschiede des Himmels-hintergrunds, der vor Milliarden Jahren übrig blieb, als unser Universum erstmals für Licht transparent wurde. Dieser kosmische Mikrowellenhintergrund ist in allen Richtungen sichtbar. Die unterschiedlichen Temperaturbereiche deuten auf Inhomogenitäten in der Materieverteilung hin. Die Planckdaten von 2018 bestätigen außerdem, dass das Alter des Universums etwa 13,8 Milliarden Jahre beträgt.

In Zukunft wird die Dunkle Energie weit entfernte Galaxien immer schneller auseinandertreiben. In sieben Milliarden Jahren wird unsere Sonne verlöschen und in hundert Billionen Jahren dürften alle Sterne ausgebrannt sein. Die einzigen massiven Objekte im Universum sind dann Schwarze Löcher und ausgebrannte Sonnen. Es beginnt ein neues Dunkles Zeitalter.

### Antihelden der Wissenschaft

Finden Sie die Geschichte schön? – Ich schon. Der Ausgang ist vielleicht ein wenig traurig, der Stellenwert von uns Menschen ein bisschen zu unbedeutend. Manches ist noch sehr unklar und bereitet den Wissenschaftlern Bauchschmerzen, wie zum Beispiel die rätselhafte Dunkle Materie und die Dunkle Energie, aus der ja dieses Universum zur Hauptsache bestehen soll – aber insgesamt hat die Abfolge der Ereignisse doch einen sehr schlüssigen Charakter. Natürlich hat die Geschichte auch ihre Helden – nämlich die Wissenschaftler, die mit ihren Entdeckungen einen Teil zu der Geschichte beigetragen und die Theorie formulierten: Einstein, Hubble, Lemaître, Gamov, Penzias, Wilson, Smoot um nur einige zu nennen.

Aber kennt noch einer die Namen derer, die mit ihren wissenschaftlichen Modellen gescheitert sind, deren Theorien sich als Irrwege herausgestellt haben? Wo sind die Antihelden geblieben, die gegen den wissenschaftlichen



Mainstream geschwommen sind? Während in der Literaturgeschichte neben den

Helden auch die Antihelden einen festen

Platz haben, man denke nur an Goethes *Werther* oder Holden Caulfield, den Hauptdarsteller aus dem *Fänger im Roggen* des amerikanischen Schriftstellers J. D. Salinger, sind die Antihelden der Wissenschaft mit ihren heute teilweise skurril anmutenden Ideen wenig populär. Das mag daran liegen, dass die Meinung vorherrscht, der Wissenschaftsbetrieb bringe Naturgesetze ans Licht. Diese Naturgesetze seien universell und für alle Zeit gültig und es sei letztlich egal, wer sie fand und unter welchen Umständen sie gefunden wurden. Warum soll man sich also mit all den Irrwegen der Vergangenheit abgeben? In der Schule und beim Lesen populärwissenschaftlicher Literatur entsteht so oft der Eindruck, dass die Wissenschaft ein einziger Siegeszug ist. Fehlschläge werden nicht absichtlich verschwiegen, jedoch ist heute die Fülle an Information über die als gesichert geltenden Erkenntnisse in jedem Bereich der Wissenschaft schon so groß, dass es ganz einfach zu viel wird, auch jedem Irrweg gedanklich zu folgen. In der Darstellung der Kosmologie bleibt damit meist die oben geschilderte schöne Geschichte übrig, vielleicht ergänzt durch Meilensteine ihrer Entdeckung.

An sich ist das auch nicht schlimm, es gibt aber einen Haken an der Sache: Wer den heute als gesichert geltenden Erkenntnisstand in den Wissenschaften mit feststehenden Wahrheiten über die Natur gleichsetzt, wird rasch bitter enttäuscht, wenn er erfährt, dass manche mit großer Überzeugung vorgetragene Theorien teilweise auf sehr unsicheren Beobachtungen beruhen oder einige Theorien

#### Zum Weiterlesen

Edward R. Harrison, *Kosmologie, Die Wissenschaft vom Universum*, Darmstadt 1984.

Malcolm Longair, *The Cosmic Century, A History of Astrophysics and Cosmology*, Cambridge 2013.

Helge Kragh, *Cosmology and Controversy, The Historical Development of Two Theories of the Universe* Princeton, New Jersey 1996.

aufgrund neuer Beobachtungen gänzlich umgeschrieben werden müssen. Und so mancher, der derart enttäuscht wurde, reiht sich vielleicht in den Zug der Verschwörungstheoretiker, die hinter jeder neuen wissenschaftlichen Erkenntnis »Fake News« vermuten. Wie also klärt man den weit verbreiteten Irrtum über die Natur der Naturwissenschaften auf? Ganz einfach, man sollte die Wahrheit über die Naturwissenschaft sagen. Aber genau da wird es schwierig und die vielen Fragen, die damit verbunden sind, werden von Philosophen seit Jahrhunderten diskutiert: Wie geht die Theoriebildung in den Wissenschaften genau vor sich? Entspringen physikalische Formeln dem Geist des Forschers und prüft er sie dann nach, oder muss er über die Beobachtung von Regelmäßigkeiten in langen Versuchsreihen die Formeln der Natur abschauen? Kann man Theorien in den Naturwissenschaften in irgendeiner Form beweisen, wie Sätze der Mathematik, oder beweisen glückliche Experimente die Theorie? Wann muss man eine Theorie als falsch verwerfen?

#### Fortschritt durch Irrtum

In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts versuchte der österreichische Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Paul Feyerabend mit seinem Buch *Wider den Methodenzwang* zu zeigen, dass es die eine wissenschaftliche Methode nicht gibt und plädierte für Offenheit hinsichtlich der Mittel zur Erkenntnisfindung. Anfangs war Feyerabend ein Anhänger des sogenannten kritischen Rationalismus von Karl Raimund Popper, der in seinem Werk *Logik der Forschung* 1934 einen interessanten Gedanken in den Mittelpunkt stellte: Auch wenn noch so viele Experimente oder Beobachtungen eine Theorie bestätigen, kann man daraus nicht schließen, dass die Theorie universell gültig ist.

Freilich gewinnen wir durch immer neue Bestätigungen größeres Vertrauen in die Richtigkeit unseres Geisteskonstrukts, aber schon der negative Ausgang des nächsten Experiments oder die folgende Beobachtung kann die Theorie vom Sockel stürzen. Popper fordert daher: Eine wissenschaftliche Theorie muss sich durch Experimente und Beobachtungen als falsch erweisen können, alles andere ist keine Wissenschaft. Popper wurde in der Folge

oft kritisiert, dass er die Methode der Falsifikation, die er weiter ausgearbeitet hat, als einzig zielführende Methode in der Wissenschaft ansah und tatsächlich haben viele Wissenschaftstheoretiker das Unternehmen Wissenschaft ganz anders beschrieben, darunter Thomas Kuhn mit seiner Theorie vom Paradigmenwechsel. Trotzdem sind die Kerngedanken von Popper heute für viele Forscher eine Leitlinie. Das bedeutet, dass Wissenschaft kein geradliniger Weg sein kann, sondern sich langsam vortasten muss. Wissenschaftlicher Fortschritt ist nur möglich, wenn manche Wissenschaftler mit ihren Theorien scheitern.

Durch Popper haben der Antiheld in der Wissenschaft und die gescheiterte Theorie einen anderen Stellenwert erhalten. Konsequenterweise könnte man darüber nachdenken, einen Nobelpreis auch für die am besten durchdachte Theorie zu vergeben, die dann letztlich an der Beobachtung gescheitert ist. Diese Ausgabe von *Kultur & Technik* versucht dem allgemeinen Trend ein wenig entgegenzuwirken und holt drei von vielen vergessene Theorien der Naturwissenschaft aus dem verstaubten Keller: die Phlogistontheorie, eine Theorie der Verbrennung aus dem 18. Jahrhundert (Beitrag ab Seite 26), die Erdschrumpfungstheorie (Beitrag ab Seite 32), ein Erklärungsmodell der Erdentwicklung und Gebirgsbildung, das in den Geowissenschaften von etwa 1860 bis 1950 vorherrschte und die Steady-State-Theorie der Kosmologie.

### Der ewige Kosmos

Die Steady State Cosmology (im Folgendem SSC genannt) ist untrennbar mit dem britischen Astronomen und Mathematiker Sir Fred Hoyle verbunden. Er bezweifelte bis an sein Lebensende die schöne Geschichte von der Entstehung des Universums in einem heißen Urknall, die ich Ihnen am Anfang erzählt habe und die heute »Standard Big-Bang Cosmology« genannt wird. Ironischerweise stammt der Ausdruck »Big Bang« von Hoyle. Er hat ihn in einem Radiointerview mit der BBC eher scherzhaft benutzt.

Die besten Zeiten für die SSC waren die 1950er Jahre. Helge Kragh bemerkte in seinem Buch *Cosmology and Controversy*, dass in den zwanzig Jahren nach der ersten Vorstellung der SSC im Jahr 1948 um die 40 Physiker auf dem Feld der SSC gearbeitet haben, wobei man bedenken

Wissenschaftliche Erkenntnis ist das Ergebnis zahlreicher Irrtümer, Umwege und Missverständnisse. Immer wieder müssen Forscher alte »Wahrheiten« über Bord werfen, um sich neuen Gedanken zu öffnen. Wie in anderen Naturwissenschaften kann sich auch in der Kosmologie herausstellen, dass morgen falsch ist, was heute noch als unumstößlich gilt

muss, dass die Kosmologie damals mit 2000 bis 3500 aktiven Wissenschaftlern ein sehr kleines Forschungsfeld war. Nach der Entdeckung des Mikrowellenhintergrunds 1965 ist diese Zahl auf eine handvoll Astronomen zurückgegangen. Mit dem Philosophen Thomas Kuhn könnte man also behaupten, bis etwa 1970 vollzog sich ein Paradigmenwechsel, und danach hat sich das neue Paradigma der Big-Bang-Kosmologie etabliert.

Die Urheber der SSC waren im Jahr 1948 Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle. Bondi, ursprünglich aus Österreich stammend, lehrte von 1945 bis 1954 an der Universität von Cambridge Mathematik, Gold forschte auf sehr unterschiedlichen Gebieten. Unter anderem war er am Bau des größten Magnetrons am Cavendish Laboratory in Cambridge beteiligt. Wie die beiden anderen war auch Hoyle nach dem Krieg nach Cambridge zurückgekehrt und hielt dort Vorlesungen. Die drei diskutierten über Astronomie und alle drei waren der Meinung, dass die relativistische Kosmologie des expandierenden Universums auf sehr wackeligen Beinen steht. Gold hatte die zündende Grundidee, dass Materie nicht am Beginn der Universums erzeugt wird – oder aus einem Urknall irgendwie hervorgeht, sondern dass Materie im Kosmos ständig neu entsteht. Dadurch würde ein dynamisches,





aber stationäres Universum möglich, in dem sich zu allen Zeiten im großen Maßstab die physikalischen Eigenschaften nicht ändern. Ein solches Universum ist ohne Anfang und Ende, deshalb die Bezeichnung *Steady State* (stabiler Zustand).

Nach Hoyles Erinnerungen entstand die Idee eines dynamischen aber stationären Universums, nachdem die drei Physiker 1946 ins Kino gegangen waren. Der Film erzählte eine Geistergeschichte, in der vier verschiedene Episoden so raffiniert aneinandergehängt wurden, dass die Handlung sich in einem Zeitkreis bewegte und am Ende zum Anfang zurückkehrte. Gold soll anschließend angemerkt haben: »Was wäre, wenn das gesamte Universum so aufgebaut ist?«. Anfangs handelte es sich also eher um ein Gedankenspiel, später vertieften sich die drei immer mehr in das Thema und arbeiteten in der Folge eine sehr schlüssige Theorie aus, die bis in die 1960er Jahre zahlreiche Beobachtungen besser erklären konnte als das Urknall-Modell.

### **Neu aber nicht ganz neu**

Wie bei vielen wissenschaftlichen »neuen Theorien« waren einige Aspekte nicht neu und gerade die Idee, dass das Universum im Grunde schon immer da war, schon im-

mer so ausgesehen hat und auch immer so sein wird, hat eine lange, eine sehr lange Tradition. Sie geht zumindest bis auf die griechische Philosophie des Aristoteles zurück und verfestigte sich in der Philosophie des Mittelalters. Aristoteles unterschied eine sublunare Sphäre, in der sich die veränderliche Welt mit den Elementen Feuer, Erde, Wasser und Luft befand, und supralunaren Sphären, die aus dem fünften Element Äther bestehen sollten. In die supralunaren Sphären eingebettet bewegen sich Planeten und Fixsterne ewig gleich auf der vollendeten Form einer Kreisbahn. Kometen wurden bei Aristoteles als veränderliche Erscheinungen konsequenterweise in der Meteorologie abgehandelt.

Als durch genaue Beobachtung am Beginn der Neuzeit einige Kometenbahnen jenseits der Mondsphäre vermutet wurden, bekam das Modell von der Unveränderlichkeit der supralunaren Sphären erste Risse. Sie wurden größer, als Tycho Brahe (1546–1601) im November 1572 eine Supernova im Sternbild Cassiopeia aufleuchten sah. Seine 18 Monate lang durchgeführten täglichen Aufzeichnungen von Position und Helligkeit des Objekts führten Brahe zu der Überzeugung, dass der neu aufleuchtende Stern jenseits der Sphäre des Saturns liegen muss und daher den Fixsterne zuzuordnen ist.

Doch sowohl diese Erkenntnisse als auch die Beobachtung der ersten sehr geringen Eigenbewegungen von Sternen im Jahr 1717 durch Halley stellten die Unveränderlichkeit des Fixsternhimmels grundsätzlich nicht infrage. Dabei birgt das Modell auch innere Widersprüche. So erkannte Wilhelm Olbers 1823, dass bei einem ewigen, statischen und dabei gleichmäßig mit Sternen gefüllten Kosmos der Nachthimmel hell erleuchtet wäre. Diese Feststellung, oder später die Anwendung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik auf das Universum als Ganzes und der hieraus gefolgerte Wärmetod, hätten zur Sichtweise eines veränderlichen, sich entwickelnden Universums führen können, doch die Annahme der Statik im Großen blieb bestehen. Sie war ein fundamentaler Bestandteil des kosmologischen Weltbildes des 19. Jahrhunderts.

Auch Albert Einstein wurde durch dieses Weltbild geprägt. 1917 veröffentlichte er den Artikel *Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie*. Auch er ging darin vereinfachend von zwei Grundpostulaten aus, die später etwas verändert auch der SSC zugrunde gelegt werden sollten. Nämlich erstens, dass die Materie auf großen Skalen im Kosmos gleichmäßig verteilt ist, und zweitens, dass der Kosmos im Großen für alle Zeiten unveränderlich ist. Die Rechnung jedoch ergab ein unter der eigenen Schwerkraft zusammenstürzendes Universum. Da Einstein dies für undenkbar hielt, führte er in die Gleichungen einen zusätzlichen Term, den Lamda-Term (auch Kosmologische Konstante genannt) ein. Dieser sollte der Gravitation entgegenwirken und rechnerisch ein zeitlich konstantes Universum liefern.

Als aber Edwin Hubble 1929 durch Analyse von Galaxienspektren feststellte, dass sich weiter entfernte Galaxien schneller von uns fortbewegen als nahe, passte eine zeitlich veränderliche, nicht stationäre Lösung der Einstein'schen Gleichungen viel besser zu den Daten. Daraus ging die Idee des expandierenden Universums hervor, die der belgische Priester George Lemaître aufgriff. Er schloss aus der Expansion des Kosmos auf die Entstehung aus einem ultradichten Anfangszustand und wurde damit zum Vater des Urknall-Modells. Für Lemaître begann das Universum mit einer Art »Uratom«. Einen sehr viel konkreteren und physikalischeren Charakter bekam das Modell erst, als sich der



Kernphysiker George Gamow für den frühen Kosmos interessierte. In den 1930er Jahren erforschte man experimentell den Mechanismus, wie sich über Kernfusion Elemente mit größeren Kernmassen aufbauen lassen und glaubte, damit die Elemententstehung in den Sternen gefunden zu haben. Es gab allerdings ein Problem: Die beobachteten Häufigkeiten der Elemente im Kosmos, gerade die großen Mengen an Helium, konnten so nicht erklärt werden. Gamow hatte die Idee, dass vielleicht die Elemente nicht in den Sternen, sondern in der explosiven Anfangsphase des Kosmos entstehen könnten, und erarbeitete mit seinem Doktoranden Ralph Alpher eine Theorie dazu. Das Ergebnis wurde in dem heute als  *$\alpha\beta\gamma$ -Paper* bezeichneten Artikel in *Physical Review* 1948 veröffentlicht ( $\alpha\beta\gamma$  steht für Alpher, Bethe, Gamow, obwohl Bethe eigentlich nicht beteiligt war). Demnach erzeugte ein heißer Urknall Wasserstoff, Helium und schwerere Elemente in den richtigen Verhältnissen. Durch Gamow bekam das Urknall-Modell die Form einer durchdachten, physikalischen Theorie und sollte im nächsten Jahrzehnt der große Rivale der SSC werden.

### Die Entscheidung

Zurück zum ewigen Kosmos: Das Team in England, Bondi, Gold und Hoyle, veröffentlichte 1948, also im selben Jahr, in dem die Gruppe der Urknall-Physiker um Gamow das  *$\alpha\beta\gamma$ -Paper* verfasste, die beiden grundlegenden Artikel zur SSC. Bondi und Gold, von denen der erste Artikel stammte, hatten eine etwas andere Herangehensweise als Hoyle. Sie gingen vom »perfekten kosmologischen Prinzip« aus, der Grundannahme, dass sich das Universum in Raum und Zeit auf großen Skalen nicht ändert. Damit hat das Universum ein unendliches Alter und genau diese Tatsache löste ein zu dieser Zeit viel diskutiertes Problem: Die damals gängigen Versionen des Urknall-Modells sagten nämlich ein Alter des Universums voraus, das kürzer ist als das Alter unserer Erde – ein offensichtlicher Widerspruch. Die Expansion des Universums, wie sie Hubble 1929 entdeckt hatte, wurde von den drei Kosmologen anerkannt und damit blieb als einziger Ausweg, anzunehmen, dass im Universum überall und ständig neue Materie entsteht. Wir merken davon nichts, weil die Rate, mit der Materie entsteht, sehr gering ist: Nur ein Wasserstoffatom

pro Kubikmeter alle fünf Milliarden Jahre oder, anders ausgedrückt, circa eine Galaxie pro Jahr im gesamten sichtbaren Universum sollte neu dazukommen. Das ist viel zu wenig, um die Entstehung im Labor verfolgen zu können. Das stationäre Universum regeneriert sich in einem Drittel der Hubble-Zeit, das sind etwa fünf Milliarden Jahre. Das Durchschnittsalter der Galaxien beträgt damit auch fünf Milliarden Jahre. Unsere Galaxie ist mit einem Alter von zehn Milliarden Jahren dann etwa doppelt so alt wie das Durchschnittsalter aller Galaxien.

Während Bondy und Gold nicht angaben, auf welche Art und Weise Materie neu entsteht, benutzte Hoyle in seiner Veröffentlichung die Skalar-Tensor-Theorie der Schwerkraft von Pascual Jordan aus dem Jahr 1939, um die Entstehung der Materie zu erklären. Er arbeitete so mit den Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, erweitert allerdings um ein sogenanntes C-Feld, und vermutete, dass dieses Feld Materie in Form von Neutronen generiert. Alle drei Verfechter der SSC waren sich einig, dass Atomkernbausteine entstehen sollten, die in den Sternen später zu schwereren Kernen fusionieren. Dass schwere Elemente tatsächlich in Sternen erbrütet werden könnten, zeigten Margeret Burbidge, Georey Burbidge, William Fowler und Fred Hoyle 1957 in einer berühmten Veröffentlichung, die als *B2FH-Paper* zitiert wird. Mit der Erzeugung aller Elemente in Sternen und der SSC ergab sich ein vollständiges Bild.

Fred Hoyle und seine Kollegen hatten sich mit ihrer Theorie weit vorgewagt, denn die SSC stellte den Energieerhaltungssatz in der bisherigen Form – ein Heiligtum in der Physik – infrage. Hoyle argumentierte immer, dass ja auch die Urknalltheorie irgendwie davon ausgeht, dass Materie entsteht, nur eben ganz am Anfang und nicht kontinuierlich. Am Ende waren es nicht theoretische Argumente dieser Art, die die SSC zu Fall brachte. Wie jede gute wissenschaftliche Theorie machte die SSC quantitativ überprüfbare Vorhersagen und diese Vorhersagen inspirierten Beobachtungskampagnen.

Erste größere Zweifel kamen auf, als die Zählung von Radioquellen Ende der 1950er Jahre nicht den von der SSC vorhergesagten Wert ergaben. Ein weiteres schwerwiegendes Problem stellte die Beobachtung dar, dass das



Der britische Astronom Fred Hoyle (1915–2001) war der bekannteste Verfechter der Steady-State-Theorie, die er durch Anpassungen auch noch verteidigte, als die meisten seiner Kollegen längst in das Lager der Big-Bang-Theoretiker gewechselt hatten.

Universum zu 25 Prozent Masseanteil aus Helium besteht. Zwar wird auch Helium in Sternen erzeugt, allerdings nicht in dieser Größenordnung, dafür kann die Entstehung dieser Mengen Helium mit dem Urknallmodell berechnet werden. Der letzte Sargnagel für die SSC war aber die Beobachtung der Mikrowellenhintergrundstrahlung 1965 durch Arno Penzias und Robert Wilson. Schon Gamow und Alpher hatten 1948 eine beobachtbare Mikrowellenhintergrundstrahlung vorausgesagt – ein Überbleibsel aus dem frühen Kosmos. Versuche von Hoyle, diese gleichmäßige, aus allen Richtungen eintreffende Strahlung als Streustrahlung des Sternenlichts zu deuten, wurden von den meisten Forschern schon nicht mehr ernst genommen. Auf der Seite der Beobachtungen hatte das Urknallmodell eindeutig das Rennen gewonnen und daher könnte man meinen, dass nach 1965 die meisten Anhänger der SSC ins Lager der Verfechter des Urknallmodells wechselten. Das war aber nicht der Fall. Eine Handvoll Kosmologen um Fred Hoyle blieb weiterhin Anhänger der SSC, änderte die Theorie aber ab, um den neuen Beobachtungen zu genügen.

Eine weitere Gruppe, wie auch Bondy und Gold, widmeten sich anderen Forschungsfeldern. Zuletzt hat Hoyle mit dem indischen Astrophysiker Jayant Narlikar zusammengearbeitet und mit ihm noch 1993 eine abgewandelte Form der ursprünglichen SSC, die »Quasi Steady State Cosmology« veröffentlicht. Nachdem Fred Hoyle im Jahr 2001 verstorben war, blieb Narlikar als einziger wissenschaftlicher Vertreter der Theorie vom ewigen Universum übrig. Für viele, die auf dem Gebiet der SSC arbeiteten, hatte diese Theorie einen außergewöhnlichen ästhetischen Reiz und war eindeutig die schönere Geschichte vom Kosmos.

Einer der wenigen Konvertiten, der englische Physiker Dennis W. Sciama, schrieb im Jahr 1967: »Ich muss hinzufügen, dass für mich der Verlust der Steady-State-Theorie Anlass zu großer Trauer war. Die Steady-State-Theorie hatte einen Schwung und eine Schönheit, die der Architekt des Universums aus einem unerklärlichen Grund übersehen zu haben scheint. Das Universum ist tatsächlich ein Flickwerk, aber ich glaube, wir müssen das Beste daraus machen.« ■■■



DER AUTOR

**Dr. Christian Sicka**  
ist Physiker und Kurator für Astronomie, Zeitmessung und den Bereich Atom-, Kern- und Teilchenphysik am Deutschen Museum.



# Alles unter Kontrolle

*Wie unser Gehirn Fehler bemerkt, kompensiert und aus ihnen lernt.* Von Markus Ullsperger

**S**eit jeher wird das Scheitern des Menschen in Kunst und Philosophie thematisiert. Es erscheint als Binsenweisheit, dass Menschen fehlbar sind und Fehler begehen. Und doch hat man erst in den letzten drei Jahrzehnten begonnen zu verstehen, wie eigene Handlungsfehler im Gehirn verarbeitet werden und welche Prozesse sie anzustoßen in der Lage sind. Fehler – Entscheidungen und Handlungen, die zu einem unerwünschten Ergebnis führen – erscheinen zunächst ausschließlich negativ: Wenn wir Fehler machen, erreichen wir unser Handlungsziel nicht. Aufwendige Korrekturen oder gar die Wiederholung der Handlung können nötig werden. In vielen Fällen ist der Fehler auch gar nicht wiedergutzumachen. Andererseits, Fehler sind in einer unsicheren Welt unvermeidlich und geben uns oft wertvolle Informationen, die uns helfen, zu lernen und unser zukünftiges Verhalten zu opti-

*»Es ist ein großer Vorteil im Leben, die Fehler, aus denen man lernen kann, möglichst früh zu begehen.«*

Winston Churchill

mieren. Sie sind eine treibende Kraft bei der Regulierung, wie viele Ressourcen unser Gehirn für einzelne Aufgaben bereitstellt. Daher ist die Erforschung der Fehlerverarbeitung und der daraus resultierenden Anpassungen seit der Entdeckung einfach erfassbarer Maße fehlerbezogener Hirnaktivität zu einem Dauerbrenner der kognitiven Neurowissenschaften geworden.

## **Wie kann Fehlerverarbeitung beim Menschen objektiv beobachtet werden?**

Bereits in den 1960er Jahren fiel in psychologischen Experimenten auf, dass Versuchspersonen sich nach fehlerhaften Reaktionen oft spontan korrigierten und nach Fehlern insgesamt langsamer und – wie man vermutete – vorsichtiger wurden. Aber wie das Gehirn die für diese Leistungen notwendige Fehlerverarbeitung umsetzt, blieb

noch längere Zeit unbekannt. Im Jahr 1990 entdeckte Michael Falkenstein aus Dortmund in den Hirnstrombildern (Elektroenzephalogramm, EEG) von Versuchspersonen elektrische Signalmuster, die spezifisch nach fehlerhaften Reaktionen auftraten. Dabei fiel ihm eine in der Mitte der Kopfoberfläche messbare negative Spannungsauslenkung auf, die er »error negativity« (Ne) nannte. Eine amerikanische Arbeitsgruppe publizierte etwas später einen sehr einflussreichen Aufsatz über dasselbe Phänomen und prägte den Namen »error-related negativity« (ERN) dafür.

Die ERN oder Ne tritt vor allem bei Fehlern in Routinehandlungen auf, wenn – meist unter Zeitdruck – eine automatisierte, aber in dem Moment falsche Reaktion ausgeführt wurde. Sie ist gekennzeichnet durch eine schnelle Spannungsänderung, die etwa 50 bis 100 Millisekunden nach der fehlerhaften Reaktion ihr Maximum erreicht. Sie wird von einer positiven Spannungsauslenkung, der »error positivity« (Pe), gefolgt. Während die ERN/Ne vermutlich die erste Verarbeitung von Informationen, die einen Fehler nahelegen, im Gehirn widerspiegelt, scheint die Pe mit dem subjektiven, bewussten Erkennen des Fehlers gekoppelt zu sein. Mit dieser Signalkaskade bestand erstmals die Möglichkeit, von außen mittels einiger am Kopf befestigter Elektroden die Fehlerverarbeitung im Gehirn millisekundengenau zu vermessen.

Im Laufe der 1990er Jahre wurden bildgebende Verfahren, insbesondere die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT), in den kognitiven Neurowissenschaften etabliert. Dadurch wurde es möglich, auf wenige Millimeter genau zu lokalisieren, welche Hirnstrukturen an bestimmten Funktionen beteiligt waren. So fand man heraus, dass ein Hirnrindenareal besonders aktiv ist in Situationen, wenn Anpassungen der Aufmerksamkeit und des Verhaltens erforderlich werden, insbesondere bei Fehlern. Es handelt sich um den sogenannten posterioren medial-frontalen Kortex (posterior medial frontal cortex, pmFC), der im Interhemisphärenspalt zwischen beiden Hirnhälften auf den Innenseiten der Stirnklappen des Großhirns liegt.

In einer technisch aufwendigen Studie kombinierten wir im Jahr 2005 fMRT- und Hirnstrommessungen und

#### Zum Weiterlesen

M. Ullsperger, *Neural bases of performance monitoring*. In: T. Egner (Hrsg.), *Wiley Handbook of Cognitive Control*. S. 292-313, Oxford 2017.

T. Endrass, M. Ullsperger, *Specificity of performance monitoring changes in obsessive-compulsive disorder*. In: *Neurosci Biobehav Rev* 46 Pt 1, S.124-138, 2014.

M. Ullsperger, C. Danielmeier, G. Jocham, *Neurophysiology of performance monitoring and adaptive behavior*. In: *Physiol Rev* 94, S. 35-79, 2014.

M. Ullsperger, *Subtile Lehrmeister. Was passiert im Kopf, wenn wir irren?* In: *Gehirn & Geist* 4, S. 36-40, 2008.

M. Ullsperger, *Minding mistakes*. In: *Scientific American Mind*, Aug/Sept, S. 54-61, 2008.

fanden heraus, dass die ERN/Ne mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit im posterioren medial-frontalen Kortex entsteht. Dieses Hirnrindengebiet besteht aus anatomisch unterschiedlichen Rindenarealen, die teilweise zum mit der Bewegungssteuerung befassten Hirnsystem gehören, das aber auch mit den Hirnstrukturen interagiert, die körperliche Funktionen wie Herz-Kreislauf-Aktion, Schwitzen und Pupillengröße steuern. Überhaupt ist die fehlersensitive Hirnrinde im pmFC mit vielen anderen Hirnregionen in einem Netzwerk der Handlungsregulation verbunden. Patienten mit Hirn-schäden in diesem Netzwerk (infolge von Verletzungen oder Schlaganfällen) haben häufig eine verringerte ERN/Ne im EEG und können auch Defizite beim bewussten Erkennen eigener Fehler aufweisen.

29 Jahre nach der Entdeckung der ERN/Ne kann man den Wissensstand so zusammenfassen: Das menschliche Gehirn verfügt über ein Handlungsüberwachungsnetzwerk, das Fehler und andere Situationen erkennt, bei denen Anpassungen der Informationsverarbeitung, der Aufmerksamkeit und des Verhaltens erforderlich sind, um Handlungsziele (noch) zu erreichen und Schaden vom Organismus abzuwenden. Der posteriore medial-frontale Kortex hat eine zentrale Rolle in diesem Netzwerk: Hier laufen Informationen aus verschiedenen, potenziell für die eigenen Handlungen bedeutsamen Ereignissen, wie Fehler oder überraschende Veränderungen der Umwelt, zusammen und es wird ein Adaptationssignal generiert. Dieses Signal zeigt an, dass Anpassungen nötig sind, wie stark diese Anpassungen sein sollten und vermutlich auch, welche Anpassungen hilfreich sind.

#### Welche Anpassungsprozesse werden durch Fehler initiiert?

Werden Fehler vom Handlungsüberwachungssystem entdeckt, beginnt eine ganze Kaskade von Anpassungsprozessen. Manche sind allgemeiner Natur, andere sind sehr spezifisch auf die aktuellen Handlungen und deren Ziele abgestimmt. Zu den allgemeinen Anpassungen gehört der sogenannte Orientierungsreflex, der von unerwarteten Ereignissen – also auch von eigenen Fehlern, die normalerweise selten und unverhofft auftreten – ausgelöst wird.

Hierbei bereitet sich der Körper auf eine möglichst rasche Reaktion vor: Herzschlag, Pupillengröße und Schweißproduktion werden angepasst. Das Bewegungssystem wird abgebremst, als wolle der Organismus innehalten und sich zur Ursache des Problems hin orientieren. Dieses Abbremsen wird auch als eine der Hauptursachen der Verlangsamung der Reaktionen nach Fehlern angesehen.

Diese allgemeinen Anpassungen haben wahrscheinlich zum Ziel, den Boden für spezifische, an die Situation angepasste Adaptationen und Korrekturmechanismen zu bereiten. So kann beispielsweise die Aufmerksamkeit zurück auf die für die aktuellen Handlungsziele wichtigen Umgebungsinformationen ausgerichtet und ablenkende Reize können ausgeblendet werden. In einer Reihe von Studien konnten wir zeigen, dass die Stärke der fehlerbezogenen Aktivität im posterioren medial-frontalen Kortex die nachfolgende Verlangsamung und auch die Regulierung der Aufmerksamkeit vorhersagt. Dabei sendet das Handlungsüberwachungssystem des Gehirns ein Anpassungssignal an viele andere Hirnregionen, die dann die entsprechende Anpassung umsetzen. Die Verlangsamung nach Fehlern wird durch ein Netzwerk realisiert, das auch beim Zurückhalten, Bremsen und Unterbrechen bereits geplanter Bewegungen aktiviert wird. Die Regulation der Aufmerksamkeit dagegen äußert sich beispielsweise darin, dass das Sehsystem die für die Zielerreichung wichtigen Informationen verstärkt und gleichzeitig die Verarbeitung ablenkender Seheindrücke unterdrückt.

Neben diesen die Informationsverarbeitung betreffenden Anpassungen induzieren Fehler auch weitere Prozesse. So wird die Bedeutung der Fehler auch emotional bewertet: Erfolg in einer Aufgabe verbessert die Stimmung, häufige Misserfolge führen zu negativen Emotionen und können die Motivation, die Aufgabe fortzusetzen, deutlich beeinflussen. Umgekehrt wurde aber auch gezeigt, dass bereits bestehende Stimmungen die Handlungsüberwachung und die Bewertung von Fehlern verändern können. In ähnlicher Weise spielt die Situation eine Rolle: die ERN/Ne wird zum Beispiel größer, wenn Fehler unter strenger Beobachtung durch andere geschehen oder wenn Fehler bestraft werden und damit eine höhere subjektive Bedeutung gewinnen.

*»Der schlimmste aller Fehler ist, sich keines solchen bewusst zu sein.«*

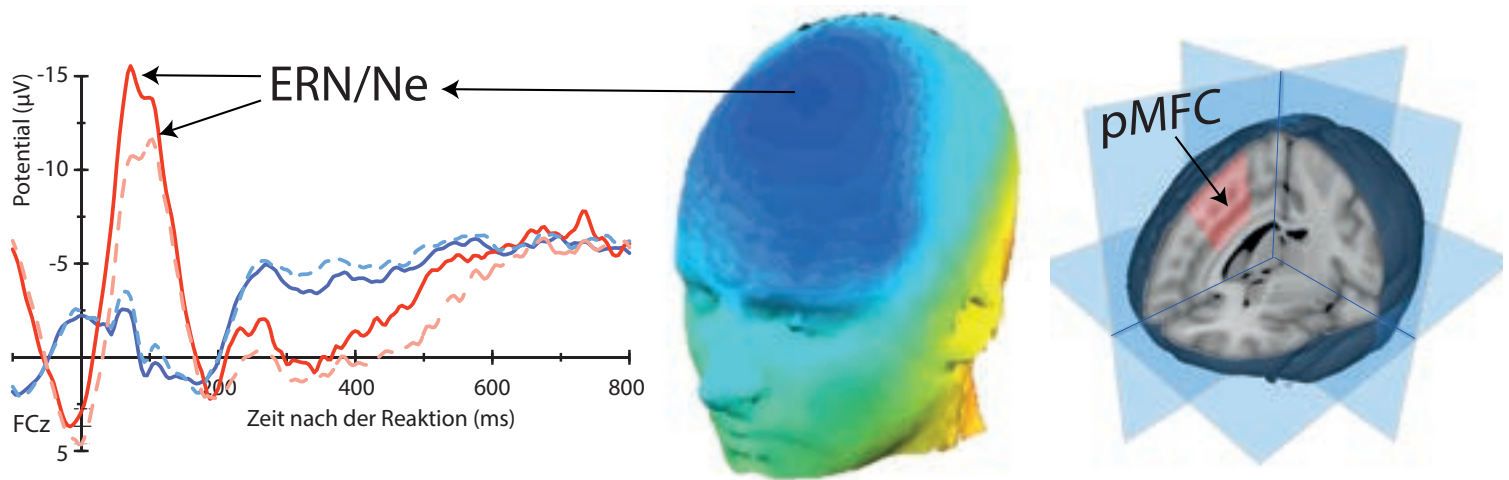
Thomas Carlyle

## Wie funktioniert das Lernen aus Fehlern?

Begangene Fehler führen nicht nur zu den oben genannten Anpassungsprozessen, wir können aus ihnen lernen und es beim nächsten Mal besser machen. Gerade Kinder erlernen viele Fertigkeiten durch Ausprobieren. Dabei unterlaufen ihnen unweigerlich Fehler und Missgeschicke. Gleichzeitig liefern diese Fehler aber auch eine Menge an Informationen – über die Umwelt, über Handlungen und ihre Konsequenzen. Diese Informationen helfen uns, später auch in komplexen Situationen die angemessenen Handlungen auszuwählen, da wir Erfahrungen über mögliche alternative Handlungsergebnisse gesammelt haben.

Die Theorie des Verstärkungslernens kann das Lernen biologischer Organismen erklären, hat aber auch die Entwicklung von Lernalgorithmen in der künstlichen Intelligenz stark geprägt. Sie bietet auch einen Erklärungsansatz für die Mechanismen der Handlungsüberwachung und des Lernens aus Fehlern. Wir führen Handlungen aus, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Zum Beispiel gehen wir in ein Restaurant, um dort ein besonders wohlschmeckendes Gericht zu erhalten. Somit sagen wir einen Wert unserer Handlung voraus, der sich aus dem erwarteten Ergebnis (der Leibspeise) abzüglich unserer Kosten (Aufwand des Weges ins Restaurant und des Auswählens, Bezahlung) ergibt. Das Handlungsüberwachungssystem stellt nun fest, ob die Handlung tatsächlich das erwartete Ergebnis hatte. Entsprach der tatsächliche Wert der Handlung (Geschmack des Essens minus Kosten) unseren Erwartungen? Eine Diskrepanz zwischen erwartetem Wert und erhaltenem Wert wird in der Verstärkungslerntheorie als Fehler der Belohnungsvorhersage (kurz »Vorhersagefehler«) bezeichnet. Ein positiver Vorhersagefehler bedeutet, dass das Handlungsergebnis besser ist als erwartet; ein negativer Vorhersagefehler heißt, dass das Handlungsergebnis schlechter ist als vorhergesagt.

Handlungsfehler sind immer mit einem negativen Vorhersagefehler gekoppelt, da sie eben ein schlechteres Ergebnis erzielen als die eigentlich geplante richtige Handlung. In der Lerntheorie wird der vorhergesagte (also gelernte) Wert einer Handlung nach jedem Handlungsergebnis anhand des Vorhersagefehlers aktualisiert: Ist ein Ergebnis besser als erwartet, steigt der Wert der Hand-



lung. Ist das Ergebnis enttäuschend, sinkt der Handlungswert. Steht das nächste Mal die Entscheidung an, ob eine Handlung ausgeführt werden sollte oder nicht, wird der gelernte Wert dieser Handlung aus dem Gedächtnis abgerufen und mit den Werten von alternativen Handlungen verglichen. Handlungen mit hohem Wert werden häufiger ausgeführt, Handlungen mit geringem Wert (oder gar der Gefahr eines schädlichen Ergebnisses) werden vermieden. Diesen Zusammenhang hat der amerikanische Psychologe Edward Thorndike bereits Anfang des 20. Jahrhunderts erkannt und als »law of effect« (Gesetz des Handlungseffekts) beschrieben.

Die Bestimmung des Vorhersagefehlers und die darauf basierende Aktualisierung des Handlungswerts wurden später mathematisch formalisiert und bilden die Grundlage von Lernalgorithmen. In den Neurowissenschaften wurde das Interesse an diesen Lernalgorithmen besonders geweckt, als in den 1990er Jahren entdeckt wurde, dass die Aktivitätsmuster bestimmter Nervenzellen im Gehirn von Affen die mathematischen Eigenschaften von Handlungswerten und Vorhersagefehlern erstaunlich genau repräsentieren. Bildgebende Verfahren und das EEG zeigten, dass auch im menschlichen Gehirn Signale repräsentiert werden, die stark den Vorhersagefehlern in Lernmodellen ähneln, die auf Computern simuliert werden. So zeigten wir und einige andere Forschergruppen, dass die ERN/Ne, die bei Rückmeldungen in Lernaufgaben im EEG gemessen werden kann, die mathematischen Prinzipien eines Fehlers der Belohnungsvorhersage widerspiegelt. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Stärke des Fehlersignals im EEG auch

**Fehlerüberwachung im Gehirn des Menschen (links):** Verlauf des ereigniskorrelierten Hirnpotenzials nach richtigen (blau) und falschen (rot) Reaktionen an der Mittellinienelektrode FCz, wobei die Versuchspersonen entweder auf möglichst hohe Genauigkeit (durchgezogene Linie) oder möglichst hohe Reaktionsgeschwindigkeit (gestrichelte Linie) achten sollten. Etwa 100 ms nach fehlerhaftem Tastendruck erreicht die fehlerbezogene Negativierung (ERN/Ne) ihr Maximum (Achtung: negative Potenziale werden beim EEG traditionell nach oben abgetragen). Die höhere Bedeutsamkeit der Fehler in der Genauigkeitsbedingung ist in einer vergrößerten ERN/Ne reflektiert (modifiziert aus: Ullsperger und Szymanowski, in: Ullsperger & Falkenstein (Hrsg.), *Errors, Conflicts, and the Brain*, Leipzig 2004). **(Mitte):** Spannungsverteilung auf der Kopfoberfläche zum Maximum der ERN/Ne. Negative Potenziale sind blau dargestellt, positive Potenziale gelb-rot. Die stärkste Negativierung tritt auf der Mittellinie im vorderen oberen Bereich des Schädels auf; dort befindet sich in etwa die Elektrode FCz. **(rechts):** Schnittbild eines menschlichen Gehirns in einer Ansicht von schräg links vorne oben. Rot markiert ist die Region des posterioren medial-frontalen Kortex (pmFC), eines Hirnrindenareals, das zentral für die Fehlerverarbeitung ist und in dem vermutlich die ERN/Ne entsteht.

das Behalten von gelernten Informationen im Langzeitgedächtnis beeinflusst. Wir können also aus Fehlern lernen, uns so neue Fähigkeiten aneignen und bereits bestehende Gedächtnisinhalte verfeinern. Wir können aber auch falsche Gedächtnisinhalte aufgrund von Rückmeldungen korrigieren. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist allerdings, dass uns unser Handlungsüberwachungssystem meldet, dass unsere aus dem Gedächtnis abgerufene Handlung ein unerwünschtes Ergebnis hat.

In Studien mit älteren Menschen wurde festgestellt, dass das Erlernen neuer Handlungen besser funktioniert, wenn die Versuchspersonen gleich auf Anhieb die richtige Handlung auswählen (»errorless learning«, fehlerloses Lernen). Wählen die Versuchspersonen zunächst eine falsche Handlung aus, dann merken sie sich auch diese falsche Handlung (»errorful learning«, fehlerbehaftetes Lernen) und haben Schwierigkeiten, auf der Basis der Rückmeldungen doch noch die korrekte Handlung zu lernen. Dieser Befund lässt vermuten, dass bei den untersuchten älteren Personen die Handlungsüberwachung einen verminderten Einfluss auf das Lernen hatte. Dieser Befund zeigt allerdings auch, dass das Erlernen des Schreibens »nach Gehör«, wie es in einigen Schulen betrieben wird, psychologischen Befunden und den Lerntheorien widerspricht. Das Umlernen einmal falsch erlernter Fähigkeiten ist auch bei gut funktionierender Fehlerverarbeitung im Gehirn aufwendiger, frustrierender und weniger erfolgreich als das primär richtige Erlernen mit sofortiger und deutlicher Rückmeldung über Erfolge und Fehler. Es ist daher nicht überraschend, dass eine kürzlich veröffent-



Wir lernen nicht nur aus eigenen Fehlern. Auch die Beobachtung von Handlungsfehlern anderer regt korrigierende Anpassungsprozesse des Gehirns an.

diese Aktivität der Initiierung von Anpassungsprozessen dient, egal ob es sich um eigene oder fremde Fehler handelt.

In der Arbeitsgruppe um Masaki Isoda in Japan wurden kurz darauf bei Makaken im posterioren medial-frontalen Kortex Nervenzellen gefunden, die sehr spezifisch dann aktiv wurden, wenn der Affe einen von einem anderen Affen begangenen Fehler beobachtete. Interessanterweise sagte die Stärke dieser Fehlerbeobachtungsaktivität Lern- und Anpassungsprozesse beim beobachtenden Affen voraus. In einem ähnlichen EEG-Experiment, bei dem Versuchspersonen abwechselnd ein Lernspiel mit Versuch und Irrtum spielten, fanden wir, dass Menschen ebenso gut aus beobachteten wie aus eigenen Handlungsergebnissen lernen können. Die Lernprozesse lassen sich durch dieselben Verstärkungsalgorithmen modellieren – aber sie scheinen stärker ausgeprägt zu sein, wenn die Versuchsperson die Fehler selbst begeht. Auch im EEG gibt es Unterschiede: Fehler der Belohnungsvorhersage sind bei beobachteten Fehlern schwächer repräsentiert als bei eigenen Fehlern. Diese Unterschiede sind Thema weiterer aktueller Studien. Sie haben zum Ziel, zu verstehen, wie wir die Ursachen von unerwünschten Handlungsausgängen erkennen und den Verursachern zuordnen.

lichte Untersuchung an Grundschulern gezeigt hat, dass das Schreibenlernen nach Gehör deutlich schlechtere Ergebnisse ergibt als andere Lernmethoden.

### Lernen wir nur aus eigenen Fehlern?

Menschen haben die Fähigkeit, Handlungen anderer zu verstehen und das Handlungsergebnis zu bewerten. Wir sind in der Lage zu erkennen, wenn andere Menschen erfolgreich sind oder scheitern. Je nach sozialer Situation und Schwere der Konsequenzen können verschiedene Emotionen mit der Beobachtung der Fehler anderer einhergehen: Erschrecken, Mitgefühl, Verständnis, Schadenfreude, Häme oder Genugtuung. Ein weiterer, mindestens ebenso bedeutsamer Aspekt ist, dass beobachtete Fehler auch Anpassungs- und Lernprozesse beim Beobachter auslösen können.

In EEG-Experimenten wurde gezeigt, dass die Beobachtung von Handlungsfehlern ähnliche Potenzialschwankungen auslösen kann wie eigene Fehler. In einer Bildgebungsstudie zeigten wir, dass der posteriore medial-frontale Kortex nicht nur bei eigenen Fehlern, sondern auch bei der Beobachtung der Fehler eines Spielpartners aktiv wird. Diese Aktivität trat unabhängig davon auf, ob der beobachtete Fehler zu einem Verlust oder Gewinn beim Beobachter führte. Wir schlussfolgerten daraus, dass die Aktivität des posterioren medial-frontalen Kortex nicht von der emotionalen Bewertung des Handlungsergebnisses abhängt. Wir entwickelten die Hypothese, dass

*»Es irrt der Mensch, solange er strebt.«*

Johann W. Goethe

### Warum machen wir überhaupt Fehler?

Bei oft ausgeführten, automatisierten Routinehandlungen haben wir alle Fertigkeiten und Informationen zur Verfügung, um immer wieder richtig zu handeln, so dass unsere Erfolgsaussichten sehr hoch sind. Gerade wenn die Handlungen sich immer wiederholen, zwar Aufmerksamkeit erfordern, und trotzdem monoton sind, unterlaufen uns hin und wieder Fehler. Wie kommt es dazu? Welche Veränderungen der Hirnfunktion gehen diesen Fehlern voraus? Wir untersuchten Versuchspersonen mit einer Aufgabe am Computer, die dauerhaft hohe Konzentration erfordert, und fanden heraus, dass es systematische Veränderungen der Hirnaktivität vor Fehlern gibt. Einerseits verringerte sich die Aktivität in einem Hirnnetzwerk, das mit der Anstrengungsbereitschaft und der für die Aufgabe nötigen Aufmerksamkeitsregulation zusammenhängt. Gleichzeitig erhöhte sich die Hirnaktivität in Regionen, die eigentlich vor allem in Ruhe aktiv sind, wenn Versuchspersonen



sonen gar keine Aufgabe lösen müssen – dem sogenannten Ruhenetzwerk (resting state oder default mode network). Diese Befunde legen nahe, dass die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen langsam von der eigentlichen Aufgabe wegdriftete und sich die Hirnaktivität mehr dem Ruhezustand annäherte, bevor ein Fehler passierte. Und tatsächlich legen direkt nach Fehlern durchgeführte Befragungen von Versuchspersonen nahe, dass sie sich vorher unwillkürlich weniger auf die Aufgabe konzentriert hatten und ihre Gedanken schweifen ließen. Dieses Gedankenumschweifen (mind wandering) ist schwer zu unterdrücken – sobald eine Aufgabe automatisiert erscheint, beginnt man, über andere Dinge nachzudenken, beispielsweise, was man nach dem Experiment zum Mittag essen wird, was man für das Wochenende geplant hat, oder worüber man sich am Morgen mit dem Partner/der Partnerin gestritten hat. Unter diesen Umständen werden die für die Aufgabe wichtigen Reize nicht mehr hinreichend gut verarbeitet und man wird anfällig für ablenkende, irreführende Reize.

Die Neurobiologie sowie EEG-Studien legen nahe, dass dieses Wegdriften der Konzentration an spezifischen Veränderungen der Hirnaktivität erkennbar ist. In manchen Experimenten begannen diese systematischen Veränderungen mehr als 30 Sekunden vor dem eigentlichen Fehler. Zukünftige Studien werden zeigen müssen, ob man diese Änderungen der Hirnaktivität hin zu einem fehleranfälligen, unkonzentrierten Arbeitsmodus hinreichend sicher identifizieren kann. Wenn ja, wäre dies ein Ausgangspunkt zur Entwicklung von Technologien, die uns helfen könnten, Fehler bei anstrengenden monotonen Aufgaben zu vermeiden.

### Störungen der Fehlerüberwachung

Psychische Störungen und neurologische Erkrankungen können die Handlungsüberwachung beeinträchtigen. Bei Schädigungen verschiedener Hirnregionen durch Verletzungen oder Schlaganfälle kann auch Jahre später die ERN/Ne im EEG als Zeichen einer funktionellen Schädigung des Handlungsüberwachungssystems vermindert oder abwesend sein. Bei Patienten mit Schädigungen des Thalamus, einer tiefen Hirnstruktur, konnten wir nachweisen, dass die bewusste Wahrnehmung von Fehlern ge-

**»Wer einen Fehler gemacht hat und ihn nicht korrigiert, begeht einen zweiten.«**

Konfuzius



DER AUTOR

**Prof. Dr. Markus Ullsperger** erforscht seit etwa 20 Jahren die Mechanismen flexiblen adaptiven Verhaltens des Menschen mittels Elektroenzephalografie (EEG) und funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) bei Gesunden und bei Patienten mit neurologischen und psychiatrischen Erkrankungen. Sein besonderes Interesse gilt der Fehlerverarbeitung, kognitiven Kontrolle und Entscheidungsfindung.

stört ist. Schwere neuropsychologische Störungen wie das »dysexekutive Syndrom«, das bei weitreichenden diffusen Hirnschäden, insbesondere des Stirnhirns, auftreten kann, können mit einer verminderten Fähigkeit, aus erkannten Fehlern die richtigen Anpassungen abzuleiten, einhergehen. Diese Patienten können ihre Fehler erkennen und benennen, aber sie können es nicht vermeiden, dieselben Fehler in ähnlichen Situationen erneut zu machen (im Englischen wird auch von der »knowing-doing dissociation«, einer Dissoziation zwischen Wissen und Handeln, gesprochen).

Patienten mit Angsterkrankungen oder Zwangsstörung haben meist eine vergrößerte ERN/Ne, was als krankhafte Überaktivität des Fehlerüberwachungssystems interpretiert wird. Zwangshandlungen wie ständiges Kontrollieren oder Waschen können auch als Versuch verstanden werden, ein erhöhtes Fehlersignal, das den Patienten das dauernde Gefühl gibt, gleich schwerwiegende Fehler zu machen, zu kompensieren. Es ist aber noch sehr viel Forschungsarbeit nötig, um die komplexen Zusammenhänge zwischen Störungen des Handlungsüberwachungssystems und psychiatrischen Erkrankungen zu verstehen und spezifische, an die Defizite in der Handlungssteuerung angepasste Therapieansätze zu entwickeln.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Gehirn des Menschen ein komplexes Handlungsüberwachungssystem hat, das es ihm ermöglicht, Situationen zu erkennen, in denen Aufmerksamkeit, Anstrengungsbereitschaft und Verhalten flexibel angepasst werden müssen. Fehlerhafte Handlungen gehören zu diesen Situationen, die schnelle und gleichzeitig länger wirksame Anpassungen erfordern, um die aus dem Fehler entstehenden Probleme zu korrigieren und zu kompensieren und um das zukünftige Verhalten so zu optimieren, dass weitere Fehler vermieden werden. Der Mensch ist also mit einem System ausgestattet, das es ihm erlaubt, eigene und fremde Fehler zu erkennen, darauf zu reagieren und aus ihnen zu lernen. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist, dass Fehler als typisch menschliche Eigenschaft akzeptiert werden, dass man offen mit ihnen umgeht, und über klare Rückmeldungen dem Handlungsüberwachungssystem ermöglicht, die richtigen Konsequenzen aus Fehlern zu ziehen. ■



# Der Feuerstoff

*Die Chemie hilft uns dabei, unsere materielle Umgebung zu verstehen. Auf dem Weg von der Alchemie zur modernen chemischen Wissenschaft liegt ein berühmter und letztlich gescheiterter Versuch, die Phänomene der Natur zu erklären: die Theorie des Phlogistons.* Von Susanne Rehn-Taube

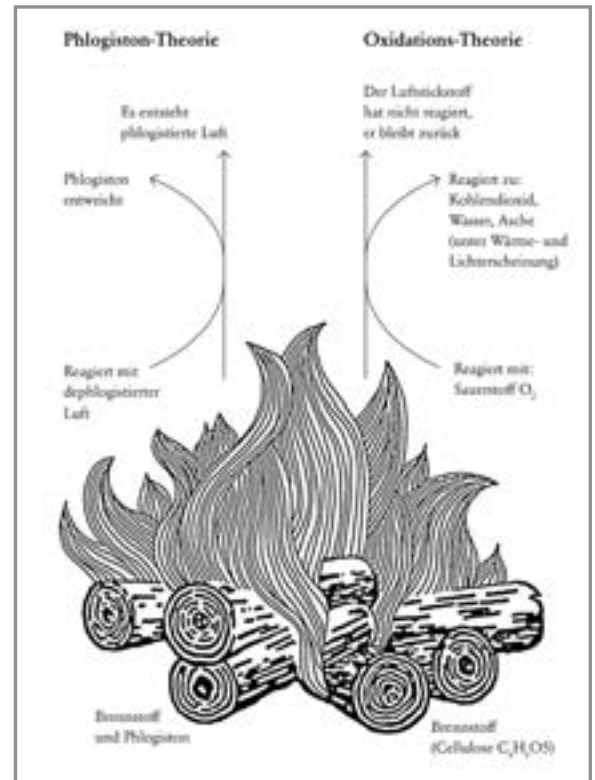
Die Alchemisten zogen bei ihrer Erklärung der stofflichen Welt noch die antike aristotelische Elementlehre zurate: Alle Materie war aus den vier Elementen Luft, Erde, Wasser und Feuer zusammengesetzt. Veränderungen waren immer nur Veränderungen im Zusammenspiel dieser vier Elemente, nicht im Anteil einzelner Bausteine. In diesem Gedankengebäude war es möglich, Metalle ineinander umzuwandeln: Fand man einen Weg zu dieser Transmutation, konnte man Blei in mehreren Stufen in Gold und mit dem roten Stein der Weisen sogar jede beliebige Materie in Gold verwandeln. Im 17. Jahrhundert traten Universalgelehrte auf, deren Beobachtungen zunehmend technischer und moderner wurden. Einer von ihnen war Johann Jo-

Bild oben: Phlogiston in einer Aufzählung chemischer Symbole in Denis Diderots Encyclopédie (1751–1772).

achim Becher (1635–1682). Er war als Berater verschiedener Fürstentümer tätig und sicherlich kein Scharlatan, gleichwohl war er von der alchemistischen Transmutation überzeugt. Als sein Hauptwerk gilt die *Physica subterranea*, die seine Erkenntnisse zur Zusammensetzung der Natur enthält. Darin tauchte auch unser zentraler Begriff auf, das Phlogiston.

Becher erklärte die Welt mit Hilfe von Prinzipien, letztlich einer Weiterentwicklung der aristotelischen Vier-Elemente-Lehre. Unter »Prinzip« verstand Becher eine Sammlung von Eigenschaften. Alle Prinzipien waren in verschiedenen Anteilen in jeder denkbaren Substanz vorhanden. War ein Stoff brennbar, folgte er dem sogenann-

Die Verbrennung von Holz in der Phlogiston- und in der Oxidationstheorie.



Georg Ernst Stahl entwickelte die Phlogiston-Theorie aus einer Reihe systematischer Versuche.

ten Schwefel-Prinzip – wohlgermerkt ohne unbedingt Schwefel zu enthalten. Eine mögliche Ausformung dieses Schwefel-Prinzips wird als »sulphur phlogiston« (in der deutschen Variante mit »anbrennlich« oder »verbrennlich«) beschrieben, auf Griechisch  $\phi\lambda\omicron\upsilon\iota\sigma\tau\omicron\nu$ . Wörtlich übersetzt bedeutet dies »verbrannt«. Da Becher darüber hinaus weitere Floskeln für verschiedene Abstufungen der Brennbarkeit benutzt, wird die genaue Bedeutung des »sulphur phlogiston« nicht ganz klar. Der Begriff kommt nur an wenigen Stellen vor und Becher war auch nicht der Erste, der diese Floskel benutzte. Obwohl es sich also nicht um einen zentralen Begriff in Bechers Weltbild handelte, wurde es zum Schlüsselbegriff für den eigentlichen Schöpfer der Phlogiston-Theorie.

### Die Phlogiston-Theorie von Georg Ernst Stahl

Georg Ernst Stahl (1659–1734) war Professor für Medizin an der Universität Halle und verfasste eine Vielzahl chemischer Schriften. Er gab 1703 auch eine Neuauflage von Bechers *Physica subterranea* heraus, für die er ein ausführliches Vorwort verfasste. Stahl wollte eine umfangreiche Erklärung der Verbrennungsvorgänge vorlegen: Warum verbrannten Stoffe so unterschiedlich? Holz hinterließ Asche. Schwefel oder Kohle verbrannten mehr oder weniger rückstandsfrei. Alle Verbrennungen wurden von Feuer begleitet, aber manche Stoffe brannten gieriger ab als andere. Metalle brannten zwar auch, bildeten aber keine Asche, sondern sogenannte Kalke, salzartige Verbindungen, die – in Wasser aufgelöst – oft sauer reagierten. Stahl versuchte, bereits in einem Supplement zu seiner Ausgabe der *Physica* einen Feuerstoff zu beschreiben: »Die Substanz, die [im Feuer] eingreift, als Zutat, so wie allgemein bezeichnet, als materielles Prinzip und als Bestandteil der Verbindung von Materie und dem Prinzip des Feuers, nicht das Feuer selbst. Das ist, was ich als erster als Phlogiston bezeichnet habe.« Wie muss man sich diesen Feuerstoff vorstellen?

In dem Werk *Opusculum Chymico-Physico-Medicum* von 1715 hieß es sinngemäß, dass das Phlogiston zwar ein materielles Prinzip sei, aber in reiner Form weder flüssig noch fest, sondern aufs Feinste in der Luft verteilt. Phlogiston war also eine Substanz, die in brennbaren Materialien steckte und beim Verbrennen entwich. Phlogiston selbst

war unzerstörbar, ließ sich aber nicht in reiner Form isolieren. Es lag immer mit anderen Substanzen verbunden vor und konnte von einer Substanz auf die andere übertragen werden. Verbrannte beispielsweise eine Kerze in einem abgeschlossenen Behälter, nahm die Umgebungsluft das Phlogiston zwar auf, hatte aber nur ein begrenztes Fassungsvermögen. Erlösch die Flamme, war das Fassungsvermögen der Luft erreicht.

Wurden Metalle verbrannt, sprach man von Calcination. Dass die gebildeten Metallkalle schwerer waren als zuvor, obwohl doch Phlogiston entwichen war, gehörte zu den größten Schwächen der Theorie. Schon Becher wuss-

### Der Paradigmenwechsel in der Wissenschaft: Thomas S. Kuhn

Während nach Aristoteles der Paradigmenbegriff noch eher einer Analogie gleichkommt, erweitert Thomas S. Kuhn (1922–1996) in den 1960er Jahren die Bedeutung des Begriffs: Ein Teil des Ganzen kann nun stellvertretend für das Ganze selbst stehen. Innerhalb eines Paradigmas bestehen eigene Begriffsdefinitionen, das Paradigma selbst wird nicht grundlegend hinterfragt. Als Beispiel nutzt Kuhn in seinem Werk *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* die Phlogiston-Theorie: Erst wenn neue Theorien auftauchen, die bestimmte Phänomene erfolgreicher begründen können als die alten, werden gemäß Kuhn auch die Fundamente einer Theorie angezweifelt. Beginnt das alte Paradigma damit zu bröckeln, kommt es zu einer Krise, die zu einer wissenschaftlichen Revolution führen kann. Dadurch wird ein neues Paradigma mit neuen wissenschaftlichen Ansichten, Methoden und Zielen etabliert. Mit der Überwindung der Phlogiston-Theorie durch Lavoisiers Oxidationstheorie wurden auch andere Grundannahmen der Chemie erschüttert und durch die neue Theorie erklärt. Dies betrifft insbesondere die Vorstellung vom chemischen Element. Nach Kuhn bedeutete das für Lavoisier nicht weniger, als dass er »in einer anderen Welt arbeitete«. **Wibke Henning**



Ein anonym Bericht zur »Beerdigung« des Phlogistons 1788/89 in Paris.

te dies. Stahl erklärte, letztendlich sei Phlogiston zu leicht und zu fein verteilt, um gewichtsmäßig nachgewiesen zu werden.

Stahls uneingeschränktes Verdienst war es, eine ganze Reihe von systematischen Versuchen durchzuführen und mit Hilfe einer allgemeingültigen Theorie zu erklären. Verbrennung, Calcination und später auch die Atmung wurden von ihm letztlich korrekt auf ähnliche chemische Prozesse zurückgeführt.

**Verbreitung und erste Zweifel**

Die Theorie war so überzeugend, dass sie im Verlauf des 18. Jahrhunderts von allen experimentell arbeitenden Chemikern übernommen, aber auch weiter ausformuliert und verändert wurde. Die großen Entdeckungen der Gaschemie im 18. Jahrhundert wurden zunächst alle in die Theorie einsortiert. Joseph Black (1728–1799) entdeckte 1754 das Kohlendioxid und nannte es »fixe Luft«. Dieses Gas ließ sich leicht nachweisen und aus der Luft abtrennen. Man stellte sehr bald fest, dass die fixe Luft bei Verbrennung und Atmung entstand. 1766 entdeckte Henry Cavendish (1731–1810) den Wasserstoff: Tropfte man Säure auf Metalle wie Zink, entstand ein leichtes, brennbares Gas, das er »brennbare Luft« nannte.

Mancher hielt dieses Gas für reines Phlogiston, das aus dem Metall entwichen war. In Wahrheit stammte dieses Gas aus dem Wasser der Säurelösung, aber das konnte zu diesem Zeitpunkt noch niemand annehmen. Zu überzeugt war man von der Vorstellung, reines Metall müsse Phlogiston enthalten. Die Knallgasreaktion, die Verbrennung von Wasserstoffgas in Luft, war damals schon bei Vorführungen beliebt. Dass dabei feine Wassertröpfchen entstanden, wurde allerdings zunächst nicht beachtet.

Schließlich entdeckten Carl Wilhelm Scheele (1742–1786) und Joseph Priestley (1733–1804) unabhängig voneinander 1773 und 1774 den Sauerstoff. Dieses Gas war Teil der Umgebungsluft und wurde als »Feuerluft« oder »dephlogistierte Luft« bezeichnet. Da Verbrennungen mit Sauerstoff lebhafter abliefen, nahm diese Luft offenbar das Phlogiston aus dem Brennstoff begieriger auf als die normale Umgebungsluft. Daniel Rutherford (1749–1819) entdeckte 1772 den Stickstoff als den Bestandteil der Luft,

der übrig blieb, wenn man in einem abgeschlossenen Gefäß eine Kerze verbrannt und die fixe Luft entfernt hatte. Dieses verbleibende Gas musste also Luft sein, die alles Phlogiston aufgenommen hatte: »phlogistierte Luft«. Viele versuchten daraufhin, das reine Phlogiston zu erhalten, also aus der phlogistierten Luft wieder abzutrennen. Dafür wurden sogar Preise ausgesetzt.

Schließlich veröffentlichte Cavendish 1784 den Nachweis, dass dephlogistierte Luft und brennbare Luft zusam-

**Reaktionsgleichungen nach der Phlogiston-Theorie**

Bei der Verbrennung wird Phlogiston aus dem Brennstoff an die Luft abgegeben. Dies äußert sich in der Erscheinung des Feuers, z. B. bei Holzkohle:

Holzkohle  $\xrightarrow{\text{Verbrennung}}$  Asche + Phlogiston

Metalle enthalten ebenfalls Phlogiston, das beim Verbrennen entweicht. Zurück bleibt ein Metallsalz oder Metallkalk (eigentlich Metalloxyd):

Metall  $\xrightarrow{\text{Verbrennung, Calcination}}$  Metallkalk + Phlogiston

Umgekehrt können Erze mit Holzkohle zu reinen Metallen umgesetzt werden. Holzkohle gibt ihr Phlogiston an das Erz ab und es bildet sich reines, phlogistonhaltiges Metall:

Metallkalk + Holzkohle  $\rightarrow$  phlogistonhaltiges Metall + Asche

Tropft man Säure auf ein Metall wie Zink, entsteht ein leichtes, brennbares Gas (Wasserstoff), das man für reines Phlogiston hielt:

Metall + Säure  $\rightarrow$  Salz + Phlogiston

Ein Bestandteil der Luft unterhält Verbrennungen besonders gut (Sauerstoff oder dephlogistierte Luft), ein anderer bleibt nach der Verbrennung zurück (Stickstoff oder phlogistierte Luft). Als Folge davon könnte man ein sehr spezielles Beispiel chemischer Transmutation formulieren:

dephlogistierte Luft + Phlogiston  $\rightarrow$  phlogistierte Luft  
 oder, in die heutige Nomenklatur übersetzt: Sauerstoff + Phlogiston  $\rightarrow$  Stickstoff

Die dephlogistierte Luft (Sauerstoff) reagiert mit brennbarer Luft/Phlogiston (Wasserstoff) zu Wasser. Beide Gase konnten also auch als Abkömmlinge des Wassers bezeichnet werden:

[Wasser + Phlogiston] + [Wasser-Phlogiston]  $\xrightarrow{\text{Funke}}$  Wasser

Lavoisier bezeichnete diese Reaktion erstmals als Oxidation:

Wasserstoff + Sauerstoff  $\xrightarrow{\text{Funke}}$  Wasser



Das Ölgemälde von Jacques-Louis David (1748–1852) (heute im Museum of Modern Art, New York) zeigt Marie und Antoine Laurent de Lavoisier gemeinsam am Experimentiertisch.

men Wasser ergaben. Die brennbare Luft hielt er zunächst ja für reines Phlogiston. Was wäre wohl das Produkt einer Reaktion aus Phlogiston und dephlogistierter Luft? Nichts? Nach der Theorie am ehesten Stickstoff (siehe Kasten »Reaktionsgleichungen nach der Phlogiston-Theorie«). Cavendish formulierte als Ausweg die Gase als Abkömmlinge des Wassers. Die antike Überzeugung, Wasser sei ein Element, scheint hier noch durch. Brennbare Luft (Wasserstoff) beschrieb Cavendish als phlogistiertes Wasser, die dephlogistierte Luft (Sauerstoff) als dephlogistiertes Wasser. Die Bildung von Wasser aus diesen Gasen war also nur eine Übertragung des Phlogistons, bei gleichzeitiger Veränderung der Materie.

In einem Nachsatz zu seiner Veröffentlichung erwähnte Cavendish die neue Theorie von Antoine Laurent de Lavoisier, die diese Vorgänge ohne Phlogiston zu erklären vermochte. Er selbst wollte aber zunächst noch bei der anerkannten Phlogiston-Theorie bleiben.

### Die Oxidationstheorie von Antoine Laurent de Lavoisier

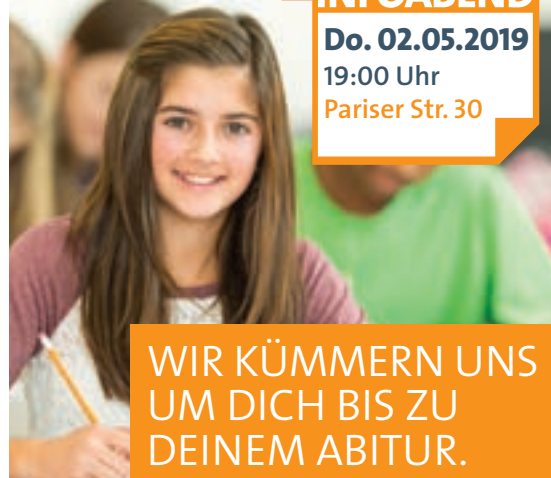
Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) war Jurist, Mineraloge und Chemiker und entwickelte am Ende des 18. Jahrhunderts eine umfassende neue Theorie. Dabei unterstützte ihn seine Frau Marie (1758–1836), die seine Versuche protokollierte, Versuchsaapparaturen zeichnete und englische Fachliteratur ins Französische übersetzte.

Lavoisier erklärte die entscheidenden Versuche systematisch neu. Bezüglich der Calcination von Metallen beschrieb er die bekannte Zersetzungsreaktion von rotem Quecksilberpräzipitat beim Erhitzen zu metallischem Quecksilber und dephlogistierter Luft (oder Feuerluft).

www.ueberreiter.de

**INFOABEND**

**Do. 02.05.2019**  
19:00 Uhr  
Pariser Str. 30



**WIR KÜMMERN UNS  
UM DICH BIS ZU  
DEINEM ABITUR.**

**Staatlich genehmigtes Ganztagsgymnasium**

- Aufnahmegespräch statt Notenschnitt
- Intensive Hausaufgabenbetreuung
- Allgemeine Hochschulreife (Abitur)
- Aufnahme während des Schuljahres möglich – auch für Realschüler

► **NEU SPORTKLASSEN** ab der 5. Klasse



**DR. FLORIAN ÜBERREITER**  
PRIVATGYMNASIUM

www.obermenzinger.de



**TAG DER  
OFFENEN TÜR**  
15. MÄRZ 2019  
14 - 17 Uhr

**IN EINER GUTEN  
ATMOSPHÄRE LERNT  
ES SICH LEICHTER!**

**Staatlich anerkanntes Ganztagsgymnasium**

- Unterricht auf Deutsch oder bilingual
- Zwei-Pädagogen-Prinzip
- Wirtschaftswissenschaftlicher Zweig ab 8. Klasse
- ABiplus® – Berufsausbildung parallel zum Abitur



**OBERMENZINGER**  
GYMNASIUM

ZWEI EINRICHTUNGEN DER MÜNCHNER SCHULSTIFTUNG ERNST V. BORRIES

Auch ohne Phlogiston in Form von Holzkohle zuzugeben, konnte das Metall rein dargestellt werden. Auch ließ sich dieser Vorgang umkehren, aus metallischem Quecksilber konnte durch Erhitzen an Luft rotes Präzipitat gebildet werden. Allein die Reaktion mit der Feuerluft vermochte die Umsetzung zu erklären – Phlogiston war keines nötig.

Im Jahr 1777 postulierte Lavoisier, dass die dephlogistierte Luft von Priestley eher ein säurebildendes Prinzip sei, da die bei der Verbrennung entstehenden Metallsalze teilweise sauer reagierten. Mit dieser Annahme konnte Lavoisier Verbrennungen und Calcination als Reaktionen mit dem säurebildenden Prinzip erklären. Gleichzeitig postulierte er die Atmung als Reaktion mit dem gleichen Gas.

Später nannte er das Gas Säurebildner oder Oxygène, zu deutsch: Sauerstoff. Eine Verbrennung war demnach eine Reaktion des Brennstoffs mit dem Sauerstoff der Luft, eine Oxidation. Statt Phlogiston an die dephlogistierte Luft abzugeben, nahm das verbrannte Material den Sauerstoff auf, ein Oxid bildete sich. Der Luftstickstoff, zuvor als phlogistierte Luft ebenfalls am Verbrennungsvorgang beteiligt, blieb einfach unverändert.

Nur Cavendishs Wasserstoff fügte sich zunächst nicht so nahtlos in das neue Gedankengebäude ein. Wenn dieses Gas – möglicherweise als reines Phlogiston – beim Einwirken von Säure aus dem Metall entstand, wie konnte dieser Versuch durch eine Oxidation erklärt werden? Lavoisier erhielt 1783 zufälligerweise Kenntnis davon, dass Cavendish bei Vereinigung von dephlogistierter Luft und brennbarer Luft Wasser erhalten hatte. Das Wasser der Säure war also die Lösung, nicht das Phlogiston. Lavoisier zeigte in der Folge rasch zwei entscheidende Dinge: Erstens wies er ebenfalls nach, dass dephlogistierte Luft (Sauerstoff) und brennbare Luft (Wasserstoff) exakt im Verhältnis 1:2 Wasser ergaben, und zweitens, dass sich Wasser in diese beiden Gase zerlegen ließ. Durch Überleiten von Wasserdampf über einen erhitzten Eisenkatalysator erhielt er die beiden Gase wieder im Verhältnis 1:2 zurück. Lavoisier widerlegte damit endgültig, dass Wasser ein unveränderliches Element ist.

Wasser wurde auch bei der Bildung der Metallkalle gespalten: Sauerstoff reagierte mit dem Metall zum Metall-



Rotes Quecksilberoxid wandelt sich beim Erhitzen in metallisches Quecksilber um, erkennbar an den grauen Tröpfchen am Reagenzglas. Dabei entsteht Sauerstoffgas.



DIE AUTORIN

**Dr. Susanne Rehn-Taube** ist Kuratorin für Chemie am Deutschen Museum. Die Chemie im 18. Jahrhundert und die Phlogiston-Theorie werden auch in der neuen Dauerausstellung Chemie im historischen Lavoisier-Labor gezeigt werden.

oxid (zuvor Kalk genannt) und der Wasserstoff entwich gasförmig. Damit war gleichzeitig der Elementcharakter der Metalle bewiesen. Metalle waren reine Stoffe, die nicht weiter zerlegt werden konnten, auch nicht in Metallkalle und in ein hypothetisches Phlogiston.

Bei all seinen Versuchen wies Lavoisier nach, dass bei chemischen Reaktionen die Massen der Ausgangsstoffe und der Endstoffe jeweils übereinstimmten, 1789 formulierte er dies als Massenerhaltungsgesetz und brachte damit die letzten Rettungsversuche zugunsten des Phlogistons ins Wanken. Louis Bernard Guyton de Morveau (1737–1816) versuchte die Gewichtszunahme der Calcination von Metallen damit zu erklären, dass Phlogiston (das bei dieser Reaktion ja entweichen sollte) spezifisch leichter als Luft sein sollte. Dies ließ sich mit dem Gesetz der Massenerhaltung jedoch nicht in Einklang bringen.

1785 bezeichnete Lavoisier die Phlogiston-Theorie als Irrweg, der den Fortschritt in den chemischen Wissenschaften verzögert hätte. Es entbrannte ein kurzer Glaubenskrieg, Chemiker teilten sich in Phlogistiker und Antiphlogistiker auf, dabei war die Sprache durchaus emotional. Mancher »hielt die Treue«, andere »traten über«.

Zu einem öffentlichen Strafgericht gegen das Phlogiston kam es 1788 in Paris: Marie Lavoisier trug als Hohepriesterin das Phlogiston zu Grabe, ein Schauspieler war in der Figur Stahls als Advocatus Diaboli zugegen, am Ende wurde das »arme« Phlogiston jedoch verbrannt.

1789 erscheint Lavoisiers Hauptwerk, *Traité élémentaire de chimie*, ein umfassendes Lehrbuch, das weite Verbreitung fand. Nur fünf Jahre später, im Jahr 1794, wurde Antoine Laurent de Lavoisier nach einem Schauprozess auf der Guillotine hingerichtet. Er war Mitglied der während des Ancien Régime besonders verhassten Vereinigung der Hauptzollpächter gewesen, die die Steuerpachten für den Regenten eintraben.

Obwohl es noch lange dauern sollte, bis die Feuer- und Wärmeerscheinungen der Verbrennungen als energetische Prozesse erklärt wurden, hatte das Phlogiston bald ausgedient. Als Paradebeispiel für einen Paradigmenwechsel markiert es allerdings einen wichtigen Meilenstein in der Geschichte der Chemie. ■■

Neue Studie zeigt:

# Hörgeräte erhalten die geistige Fitness

Erstmals belegt nun eine aktuell veröffentlichte Langzeitstudie, dass das Tragen von Hörgeräten den Erhalt von geistigen Fähigkeiten im Alter unterstützt



Neueste Technologien der aktuellen Hörgeräte-Generation ermöglichen unter anderem auch das 360°-Hören.

Viele Menschen verbinden das Tragen von Hörgeräten mit Altwerden und haben beim Gedanken an Hörgeräte die pfeifenden Ungetüme der eigenen Großmutter vor Augen. Was das Altsein betrifft, ist das Gegenteil der Fall. Wer schlecht hört, altert schneller, weil ihm der Austausch mit anderen Menschen bei Aktivitäten und im Gespräch fehlt und dadurch Hören und Sprache immer mehr abhandenkommen. Um geistig fit zu bleiben, ist es wichtig, auch das gute Hören zu pflegen.

## Nur wenige suchen Hilfe

Unter älteren Menschen ist Schwerhörigkeit die am weitesten verbreitete chronische Krankheit. Laut der Weltgesundheitsorganisation leiden weltweit 360 Millionen Menschen unter einem Hörverlust, der ihr Leben beeinträchtigt. Circa 15 Millionen von ihnen leben in Deutschland. Allerdings sucht nur ein Viertel von ihnen Experten auf, um das Problem zu lösen. Hinzu kommt, dass selbst von diesen 25 Prozent viele Hörgeschädigte rund sieben bis zehn Jahre zu lange warten, bis sie sich Hilfe suchen. Dabei können Hörgeräte helfen, die »Gehirnfitness«, also die geistige Leistungsfähigkeit zu bewahren, wie eine Langzeitstudie der Universität Bordeaux unter Leitung der Professorin Hélène Amieva zeigt. An der Studie *Self-Reported Hearing Loss, Hearing Aids, and Cognitive Decline in*

*Elderly Adults: A 25-year Study* nahmen über einen Zeitraum von 25 Jahren 3.670 Senioren ab 65 Jahren teil. Das Ergebnis ist eindeutig: Teilnehmer, die trotz Schwerhörigkeit keine Hörgeräte trugen, schnitten bei dem Test deutlich schlechter ab als Hörgeräte-Träger. Deren Testergebnisse unterschieden sich überhaupt nicht von denen der Gleichaltrigen mit gesundem Gehör. Hörgeräte können somit dazu beitragen, länger geistig gesund zu bleiben.

## Hörverlust und soziale Interaktion

Laut den Forschern steht der beschleunigte geistige Abbau der Schwerhörigen ohne Hörgeräte wahrscheinlich im Zusammenhang mit dem Mangel an sozialer Interaktion. Ältere Menschen ziehen sich aufgrund eines Hörverlusts aus geselligen Aktivitäten zurück. Die Studie bestätigt nun, dass sich das Tragen von Hörgeräten positiv auf das Sozialleben auswirkt. Dadurch wird das Risiko eines schnelleren Nachlassens der geistigen Fähigkeiten vermindert. Denn mit Hörgeräten können schwerhörige Menschen wieder besser kommunizieren. Sie gehen mehr unter Leute und sind wieder mittendrin. Das ist anregend und führt dazu, dass geistige Fertigkeiten nicht so schnell verloren gehen. Modernste Hörgeräte unterstützen das Gehirn aktiv bei seiner Versteharbeit und sorgen dafür, dass der Klangeindruck mit Hörgeräten detailreich und sehr natürlich



Nahezu unsichtbare, winzig kleine Hörsysteme, die im Ohr verschwinden können, sorgen als Hochleistungscomputer für besseres Hören.

ist. Das Verstehen wird wieder leichter und weniger anstrengend. Das Gehirn braucht weniger Energie zum Verstehen, die für andere geistige Aufgaben, z. B. sich etwas zu merken, genutzt werden kann.

## Verbesserung der Lebensqualität

Für ein aktives und erfülltes Leben lohnt es sich also, bei Hörverlust schnell zu reagieren und sich auf die Suche nach passenden Hörgeräten zu machen, die die individuellen Hörvorlieben und den eigenen Lebensstil berücksichtigen. Je schneller auf den Hörverlust reagiert wird, umso eher wird Lebensqualität gewonnen. Wer wissen möchte, ob sein Gehör noch in Ordnung ist, kann bei einem Hörakustiker einen kostenlosen Hörtest durchführen lassen. Dort werden Sie fachkundig bei Fragen rund um das Thema Hören beraten.



An den historischen Beispielen lässt sich erkennen, welch enormen Fortschritt die Hörakustik-Technologie von der Jahrhundertwende bis in die Gegenwart des 21. Jahrhunderts gemacht hat: Vom simplen »Hörrohr« über einfache »Hörverstärker« bis hin zu modernsten Hochleistungs-Hörgeräten der Gegenwart, die sich über das Smartphone steuern und mit dem »Internet der Dinge« verbinden lassen. Was vor 10 Jahren noch als »Zukunftsmusik« galt, ist nun Realität geworden.



# Hilfe! Die Erde schrumpft?

*Warum ist die Oberfläche der Erde rissig und faltig statt glatt? Könnte es sein, dass unser Heimatplanet langsam aber unaufhaltsam verschrumpelt – vergleichbar einem vertrocknenden Apfel? Die Kontraktionstheorie lieferte scheinbar plausible Erklärungen für diese These – bis Alfred Wegener die Idee der Kontinentaldrift formulierte.* Von Frank Holzförster

**D**ie Erde hat ein Alter von etwa 4600 Millionen Jahren. Zu Beginn ihrer Geschichte befand sie sich in einem vollständig geschmolzenen Zustand und war einem allmählich abnehmenden Bombardement von ganz unterschiedlich großen Himmelskörpern ausgesetzt. Deren Bewegungsenergie wurde beim Aufprall auf die Erde in Wärme umgewandelt. Außerdem zerfielen die schweren radioaktiven Elemente des Erdkörpers und produzierten dabei ebenfalls Wärme. Mindestens 300 Millionen Jahre lang blieb die Erdoberfläche daher glutflüssig heiß. Erst als die Energiezufuhr durch die Meteoriteneinschläge nachließ, konnte die Erdoberfläche langsam abkühlen und die heiße Gesteinsschmelze begann zu gesteinsbildenden Mineralen zu kristallisieren. Dabei bildete sich die feste steinerne Erdkruste, auf der sich das gesamte Leben auf der Erde abspielt.

Aufgrund der Entdeckung radioaktiver Minerale und dem Verständnis, dass radioaktive Stoffe eine konstante Zer-

fallsreihe besitzen, entwickelte Ernest Rutherford zu Beginn des 20. Jahrhunderts erste Ideen, dieses Wissen zur Altersbestimmung von Mineralen und Gesteinen zu nutzen. Seither werden Gesteine tatsächlich datiert und man suchte weltweit nach uralten Gesteinsformationen – schließlich geben diese Aufschluss über die ganz frühe Erdgeschichte. Für Jahrzehnte galten die Gesteine im Südwesten Grönlands als die ältesten Gesteine der Erde. Mit einem radiometrischen Alter von circa 3710 bis 3790 Millionen Jahren (Appel et al. 1998) sind sie jedoch viel jünger als die Acasta-Gneise im Nordwesten Kanadas mit ihren 4002 bis 4031 Millionen Jahren (Bowring & Williams 1999). Von der kanadischen Hudson Bay sind inzwischen Amphibolit-Gesteine bekannt, deren Alter sogar bei 4280 Millionen Jahren liegt (O’Neil et al. 2008), was aber bis heute noch nicht vollständig akzeptiert ist.

Schon früh in der Geschichte der Erdwissenschaften waren sich die Geologen einig, dass eine feste Gesteinskruste



an der Oberfläche des jungen Planeten Erde nur durch Kristallisation infolge der Abkühlung entstanden war. Dennoch, glutflüssiges Material war und ist offenbar darunter noch weit verbreitet – vulkanische Eruptionen weltweit belegen das. Kristallisation ist ein Prozess, der bei nahezu allen Schmelzen zur Verfestigung bei gleichzeitiger Volumenverringerung führt. Die große Ausnahme ist die Schmelze Wasser, die bei der Kristallisation zu Eis ihr Volumen vergrößert.

Gesteinsschmelzen verhalten sich jedoch »normal«. Das ist beispielsweise an vulkanischen Gesteinen an den Basaltsäulen gut nachvollziehbar. Sie entstehen durch den Schrumpfungsprozess während der Kristallisation, was eigentlich nichts anderes ist, als die physikalisch bedingte symmetrische Anordnung der in der Schmelze enthaltenen chemischen Verbindungen. Durch die Kristallisation wird quasi die ungeordnete Ansammlung durch Ordnung ersetzt. Ein Haufen Holzschelte benötigt viel mehr Raum als die gleiche Menge Holz, wenn sie ordentlich aufgeschichtet ist!

Im 19. Jahrhundert waren Überlegungen solcher Art, zusammen mit den Forschungsreisen berühmter Forscher wie Alexander von Humboldt nach Südamerika, höchst einflussreich auf die Theoriebildung zur Entwicklung der Erdoberfläche. Der französische Geologe Élie de Beaumont stellte 1829 der Académie des Sciences in Paris einen Aufsatz vor, in dem er die Kontaktflächen (Diskordanzen), an denen Gesteinspakete, oft mit markantem Winkel, aneinanderstoßen und an denen ein auffälliger Wechsel des Fossilinhalts zu beobachten ist, auf katastrophale Umwälzungen in der Erdgeschichte zurückführte. Er meinte, diese könnten das Ergebnis einer Phase der Gebirgsbildung sein.

Die Ursache der Gebirgsbildung allgemein sah Élie de Beaumont in der stetigen Abkühlung des Erdkörpers. Da die Erde beständig Wärme an den kalten Weltraum abgibt, verringert sich ihr Volumen beständig und dadurch würden in der Gesteinkruste vorwiegend kompressive Deformationen erzeugt, vergleichbar mit der schrumpfenden Schale eines trocknenden Apfels. Lang gezogene Gebirgsketten, mit deren Entstehung sich auch Humboldt auf seiner Südamerikareise (1799–1804) beschäftigte, würden sich auf der Erdoberfläche als Folge des Schrumpfungsprozesses ausprägen. Durch die Schrumpfung müssten sich Spannungen aufbauen, die dann in weltweit nahezu gleichzeitigen plötzlichen

Ereignissen verschiedene Gesteinspakete an den im Gelände beobachteten Diskordanzen versetzen würden. Damit begründete Élie de Beaumont die tektonische Grundidee zur Erklärung einer phasenhaften Gebirgsbildung. Der US-amerikanische Geologe James D. Dana wurde bald zum prominentesten Verfechter der Kontraktionstheorie, die daher auch stets mit seinem Namen in Verbindung gebracht wird. Er hatte auf einer Forschungsreise im Pazifik (1838–1842) durch die Untersuchung von Korallenriffen festgestellt, dass sich der Ozeanboden absenkt, und entwickelte die Vorstellung fundamentaler Unterschiede zwischen Ozeanbecken und Kontinenten.

Aus geografischen Beobachtungen wie der linearen Anordnung vieler Vulkaninseln und der pazifischen Randgebirge schloss er auf ein fundamentales System von Klüften und Spalten, die schon während der frühen Schrumpfung der Erde entstanden waren. Weil die Kontinente bereits »frei von eruptivem Feuer« seien, müssen diese zuerst abgekühlt und folglich sehr alt sein. Demgegenüber erkannte er die Ozeanbecken mit ihren aktiven Vulkanen und ihrer abgesenkten Topografie als die Regionen der Abkühlung und Kontraktion. Weil Gesteine verschiedene Wärmeleitfähigkeit hätten, würden sie sich beim Abkühlen unterschiedlich stark zusammenziehen. In Danas tektonischem Weltbild passte nun alles zusammen: Großräumige Unterschiede beim Abkühlen erklären das Absinken der Ozeanbecken und verursachen gleichzeitig die Hebung der Kontinentalränder; seitwärts wirkende Kräfte bewirken Erdbeben und legen die Gesteine in Falten. In Europa sind es vor allem die Alpengeologen Albert Heim in Zürich und Eduard Suess in Wien, die die Kontraktionstheorie weiterentwickeln. Albert Heim quantifizierte die Schrumpfung des Erdumfangs dadurch, dass er die Alpen wieder auseinanderzuziehen versuchte. Diesem



#### Zum Weiterlesen

P.W.U. Appel, C.M. Fedo, S. Moorbath, Myers, *Early Archean Isua supra-crustal belt, West Greenland: Pilot Study of the Isua Multi-disciplinary Research Project. Geology of Greenland. In: Survey Bulletin 180, S. 94-99, 1998.*

S.A. Bowring, Williams, *Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. In: Contributions on Mineralogy and Petrology 134, S. 3-16, 1999.*

J. O'Neil, R.W. Carlson, D. Francis, Stevenson, *Neodymium 142 evidence for Hadean mafic crust. In: Science 321, S. 1828-1831, 2008.*



Der Vulkan Kilauea auf Big Island, Hawaii, spuckt seit Jahren kontinuierlich heißes Magma aus. Die brennenden Lavaströme fließen ins Meer und erinnern an die Anfänge der Erdgeschichte.

Versuch lag der Gedanke zugrunde, dass die geglättete Schale eines vertrockneten Apfels wieder die ursprüngliche Größe des Apfels repräsentieren würde. Er errechnete durch Glättung der Alpen und des Jura Gebirges in der Westschweiz, dass der Erdumfang ohne diese Gebirge um 120 Kilometer größer sein würde. Das würde einer Schrumpfung der Erde um 0,3 Prozent entsprechen. Die trotz der Abkühlung der Erdkruste weiterhin auftretenden Erdbeben begründete Eduard Suess mit starken Spannungen bei der Kontraktion. Er unterscheid vertikale Spannungen, die die Absenkung der Erdkruste verursachen, von horizontalen Spannungen, die schiebende und faltende Wirkung haben. Seiner Ansicht nach erzeugt die Absenkung die horizontalen Spannungen, da es zum Erdinneren hin immer enger wird. Wären die horizontalen Spannungen im Gleichgewicht, so würde die Erdkruste ein selbstständiges und festes, glattes Gewölbe sein, während sich das Erdinnere unabhängig von der Kruste zusammenziehen müsste. Da die horizontalen Spannungen aber offenbar nicht im Gleichgewicht sind, führt das Abkühlen des Erdinneren zum Zusammenbrechen des Krustengewölbes, wodurch es zur Gebirgsbildung durch seitliche Einengung kommt und diese im Nachgang Vulkanismus und Erdbeben auslöst. Diese Idee greift der Schriftsteller Jules Verne etwa zeitgleich literarisch auf, als er seine Protagonisten auf der *Reise zum Mittelpunkt der Erde* das riesige Gewölbe mit dem Lidenbrock-Meer durchqueren lässt.

Als einer der letzten großen Verteidiger der inzwischen immer stärker angezweifelte Kontraktionstheorie ist der deutsche Geologe Hans Stille zu nennen. Er hatte bei seiner

Arbeit in Niedersachsen ein Ineinandergreifen von Zusammenschub und Zerrung der Erdkruste festgestellt und gelangte zu der Ansicht, dass neben der generellen Schrumpfung der Erdkruste auch Perioden der Ausweitung auftreten müssen. Diese und weitere Entdeckungen brachten ihn zu der Erkenntnis, dass Gebirgsbildungen in typischen Phasen ablaufen, deren Ursache in der Kontraktion des Erdkörpers liegen. Hans Stille glaubte, für Europa vier solcher sich wiederholender Gebirgsbildungsphasen definieren zu können, wobei deren letzte die »alpidische« Bildung Neo-Europas sei. Hans Stille ist sicherlich der letzte bedeutende Anhänger der Kontraktionstheorie als möglicher Motor der Erdkrustebewegungen gewesen.

So attraktiv und ganzheitlich der Vergleich der abkühlenden Erde mit einem vertrocknenden Apfel ursprünglich die bekannten Phänomene der Gebirgsbildung erklären konnte, so schwierig blieb es, die Kontraktionstheorie letztlich hinlänglich zu beweisen. Fortschreitende Erkenntnisse der Geowissenschaften aus allen Teilen der Welt, die immer weniger auf reiner Beobachtung beruhten, sondern zunehmend von stetig feineren Messdaten gestützt wurden, ließen sich nun auch anders interpretieren. Als Alfred Wegener 1915 die Kontinentaldrifttheorie vorstellte, war eine alternative Erklärung für die Entstehung von Gebirgen verfügbar. Mit der Weiterentwicklung der Kontinentaldrifttheorie zum zunehmend besser begründeten Konzept der Plattentektonik ab den 1960er Jahren war die Kontraktionstheorie dann endgültig gescheitert. Heute ist sie höchstens noch eine Randbemerkung in der Wissenschaftsgeschichte der Geologie. ■■



DER AUTOR



**Dr. habil. Frank Holzförster** ist wissenschaftlicher Leiter der Umweltstation GEO-Zentrum an der Kontinentalen Tiefbohrung KTB in Windischeschenbach.

# Und was machst du ...

*... am Wochenende? Nicht nur in – auch um München herum gibt es viele spannende Ausflugsziele für Wissensdurstige. »Kultur&Technik«-Autor Christian Rauch war im Münchner Umland unterwegs und hat dabei die spannendsten Entdeckungen gemacht. Hier findest du eine kleine Auswahl. Und wenn in deiner Familie am kommenden Freitag gefragt wird: »Was machen wir am Wochenende?«, dann kannst du bereits einige Ideen aus dem Ärmel zaubern.*



Forschernachwuchs auf Erkundungstour in der ESO Supernova.

## ESO Supernova in Garching In den Weltraum hineinschauen

Die riesigen Teleskope der Europäischen Südsternwarte (ESO) sind Tausende Kilometer entfernt. Sie stehen in einer chilenischen Wüste, wo der Himmel klarer, trockener und weniger lichtverschmutzt ist als in Europa. Im Norden Münchens aber hat die ESO, die weltgrößte Astronomieorganisation, ihre Zentrale. Seit dem letzten Frühjahr bietet sie Besuchern dort eine öffentliche Ausstellung. »ESO Supernova« heißt das futuristische Gebäude, das einem Doppelsternsystem nachgebildet ist. Im Inneren schlängelt sich ein fast 300 Meter langer barrierefreier Weg durch 13 Bereiche: an interaktiven Stationen werden unter anderem

unser Sonnensystem, die Galaxien, kosmische Mysterien und Bedrohungen erklärt. Und es gibt Antworten auf viele Fragen, zum Beispiel: wie, seit wann und warum wir Menschen Astronomie betreiben oder wie wahrscheinlich es ist, dass es außerirdisches Leben gibt. Ein Highlight ist das große Planetarium.

Karl-Schwarzschild-Str. 2,  
85748 Garching bei München.  
Geöffnet M–Fr 9–17 Uhr, Sa/So 12–17 Uhr.  
Selbsterkundung der Ausstellung kostenlos,  
Planetariumsshows und geführte Touren  
kostenpflichtig, Buchung empfohlen:  
[supernova.eso.org](http://supernova.eso.org)



## Forschungscampus Garching

### Mit Robotern und Computern basteln

Im »MakerSpace« stehen hundert computergesteuerte Hightech-Fertigungsmaschinen: kleine und große 3-D-Drucker, Laserschneider, Fräsen und ein Wasserstrahlschneider, der mittels Wasserstrahl mit 4000 bar Druck sogar Gestein und Stahl durchschneiden kann! Bei den kostenlosen Führungen kann man die Geräte ansehen. Wer Lust am Bauen entwickelt hat, kann kostenpflichtig Mitglied werden und die Maschinen nach Einweisungskursen selbst benutzen. Ersatzteile für technische Geräte, Schmuck, Spielzeug, Möbel und Kleidung, all das bauen »Maker« mit Hilfe solcher Maschinen selbst. Unterstützung bekommen sie im »FabLab München«. In dem Verein nahe der Donnersbergerbrücke gibt es eine ehrenamtlich geführte Hightechwerkstatt. Dazu gehören ein Elektroniklabor, Maschinen zur Textilverarbeitung und Bildungsräume. Der FabLab München e. V. organisiert regelmäßig Open FabLabs, eine offene Werkstatt für Jugendliche, Geburtstagsfeiern und Ferienprogramme sowie Kurse für Erwachsene, Kinder und Schulklassen. Beim »Laser-Abend« lernt man, wie man mit einem CO<sub>2</sub>-Lasercutter Holz, Acrylglas, Pappe oder Leder schneiden oder gravieren kann. Für den 3-D-Drucker modelliert man Objekte, damit sie ein FDM-Drucker (Fused Deposition Modelling, deutsch: Schmelzschiichtung) aus feinsten Kunststoffäden aufbauen kann.

MakerSpace, Lichtenbergstraße 6,  
85748 Garching bei München.  
FabLab München e.V., Gewerbehof Westend,  
Gollierstraße 70, Eingang D, 80339 München.

In beiden Labs Führungen und Angebote für  
Besucher und Mitglieder, siehe  
[www.maker-space.de](http://www.maker-space.de) bzw. [www.fablab-muenchen.de](http://www.fablab-muenchen.de)

In der Hightechwerkstatt des  
MakerSpace kann man Holz  
per Computer zuschneiden.

## BayernLAB in Traunstein

### Virtual Reality, Drohnen und IT-Sicherheit

»BayernLabs« sind Informationsplattformen für Schüler, Bürger, Kommunen und Technikinteressierte. Das erste oberbayerische BayernLab steht in Traunstein. An insel-förmigen Stationen kann man die Themen der Digitalisierung anschaulich kennenlernen und soll, so der Leiter des Labs, alles auch anfassen und ausprobieren! Von Technologien des Highspeed-Internet wie 5G, über Sicherheit im Netz und den Arbeitsplatz der Zukunft bis zu GPS und Geodaten sowie digitalen Verwaltungsangeboten. Einen 3-D-Drucker kann man werkeln sehen, einen kleinen Multikopter, landläufig »Drohne« genannt, fliegen lassen und eine moderne Virtual-Reality-Brille aufsetzen. Mit Augen, Gehirn und Händen begibt man sich damit ins Innere verschiedener bayerischer Sehenswürdigkeiten, zum Beispiel in das Schloss Neuschwanstein oder die Kaiserburg in Nürnberg. Regelmäßig werden auch Vorträge und Workshops zu speziellen Themen organisiert.

BayernLab im Gebäude des Amtes für  
Digitalisierung, Breitband und Vermessung,  
Salinenstraße 4, 83278 Traunstein.  
Eintritt kostenlos. Geöffnet Mo, Di 10–17 Uhr,  
Mi 14–17 Uhr, Do 10–14 Uhr und nach  
Vereinbarung, [www.bayernlabs.bayern](http://www.bayernlabs.bayern)

## Illerkraftwerk in Kempten

### Die Kraft des Wassers bestaunen



Vom Wasser der Iller wird  
das Kraftwerk in Kempten  
angetrieben.

Das Walchenseekraftwerk in Kochel erzeugt seit fast 100 Jahren Strom aus dem natürlichen hochgelegenen Speicher des Walchensees und steht bei vielen Schulen als Ausflugsziel auf dem Lehrplan. Aber weitaus zahlreicher sind Laufwasserkraftwerke an bayerischen Flüssen. Neben der Isar ist es unter anderem die im Allgäu entspringende Iller, die für diese Form der Energiegewinnung genutzt wird. Das Illerkraftwerk in Kempten erklärt auf sehr informativen Führungen, wie Wehr, Rechen, Fischaufstiegshilfen, Turbinen und Generatoren zusammenwirken. Architektonisch preisgekrönt ist die 95 mal 22 Meter große Kuppel, die das Kraftwerk überspannt. Sie kann sich bei wechselnden Temperaturen ausdehnen und bietet zugleich Schallschutz nach außen. Überrascht ist man als Besucher denn auch, wenn man den großen lauten Turbinen im Inneren gegenübersteht, die gemeinsam mit den darüber angebrachten Generatoren mehr als 60000 Liter Illerwasser pro Sekunde in 2,7 Megawatt Energie umwandeln.

Illerkraftwerk, Keselstraße 14 a, 87435 Kempten.  
Kostenlose Führung nach Anmeldung von April bis  
Oktober, Do 17.30 Uhr und Sa 10 Uhr.



**Forschungszentrum auf der Zugspitze**  
**Wissenschaftler auf 2650 Meter Höhe besuchen**

Deutschlands höchsten Berg besuchen Hunderttausende Touristen pro Jahr. Die meisten fahren hinauf, um den Panoramablick auf unzählige Gipfel zu genießen. Doch die wenigsten von ihnen wissen, dass das Schneefernerhaus auf 2650 Meter Höhe ein weltweit einzigartiges Umweltforschungszentrum ist. Über zehn Forschungsinstitutionen untersuchen unter anderem Klima und Atmosphäre, kosmische Strahlung und Radioaktivität, Hydrologie (Lehre vom Wasser), Umwelt- und Höhenmedizin. Der meteorologische Turm auf dem Gipfel zeichnet seit fast 120 Jahren das Wetter auf. Und was dort gemessen wird, kann man an den Zugspitzgletschern hautnah beobachten: den Klimawandel. Bei Führungen oder Begehungen des Lehrwegs staunt man, wie enorm die beiden Schneefernergletscher in den vergangenen Jahrzehnten geschrumpft sind. Spitzentechnik schließlich bietet die 2017 eröffnete Seilbahn vom Eibsee auf den Gipfel mit der 127 Meter hohen Stütze, der höchsten Pendelbahnstütze ihrer Art weltweit. Dahinter beginnt das mit 3213 Metern weltweit längste freie Spannfeld einer Seilbahn, direkt über der Zugspitz-Nordwand.

Seilbahn Zugspitze, Am Eibsee 6, 82491 Grainau. Im Rahmen des Bergbahntickets frei nutzbar sind Technik- und Gletscherführungen, der GletscherErlebnisWeg, Sommerrodelhang und AlpinPark. Kostenpflichtige Führungen durch das Schneefernerhaus sind buchbar nur für größere Gruppen. [www.zugspitze.de](http://www.zugspitze.de), [www.schneefernerhaus.de](http://www.schneefernerhaus.de)



*Appetit auf mehr? Im Buch »Technik und Wissenschaft erleben« präsentiert Christian Rauch über 40 Ziele rund um die Landeshauptstadt. Das reicht fast für ein ganzes Jahr.*

Abbildungen: FAB/Lab München, Christian Rauch (2)

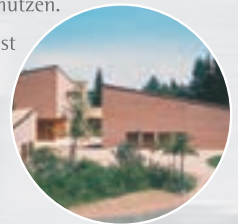


**Unsere Schule**

ein unbequemer –  
fröhlicher Ort



- Weil wir uns verpflichten, einander zu respektieren.
- Weil gegenseitiges Vertrauen stark macht.
- Weil alle ermutigt werden, die Freiheit des Einzelnen in unserer Gemeinschaft zu schützen.
- Weil junge Menschen sich selbst entdecken, ihre Gaben und Fähigkeiten entfalten.
- Weil wir den Widerspruch erwarten.
- Weil alle ermutigt werden, Bindungen einzugehen und Verpflichtungen wahrzunehmen.
- Weil uns Fehler helfen, Stärken weiterzuentwickeln.
- Weil wir im Interesse unserer Schüler auch dem Missbrauch von Macht und Einfluss entgegenreten.
- Weil wir den Mut haben, miteinander fröhlich zu sein.



[www.derksen-gym.de](http://www.derksen-gym.de)



**INTENSIVE BERATUNG  
 UND VORBEREITUNG  
 auf den Übertritt ins Gymnasium.  
 Langjährige und gute Erfahrung mit  
 Ein- und Umschulungen.**

60 JAHRE



KLEINES PRIVATES LEHRINSTITUT

**DERKSEN**

SEIT 1959 GYMNASIUM

SPRACHLICH • NATURWISS.-TECHNOLOG.  
 STAATL. ANERKANNT • GEMEINN. GMBH

Pfingstrosenstraße 73 • 81377 München  
 Telefon 089/780707-0 • Fax 089/780707-10

# Der Saum der Finsternis

*Die totale Sonnenfinsternis am 21. August 1914 und der gescheiterte erste Versuch, die Allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins empirisch zu bestätigen.*

Von Gerhard Hartl

Mond und Sonne während der totalen Sonnenfinsternis am 21. August 1914, Aufnahme Adolf Miethe.

Eines der spannendsten Kapitel der Physikgeschichte des beginnenden 20. Jahrhunderts handelt von der Formulierung der Relativitätstheorien Albert Einsteins (1879–1955). Dieser hatte 1905 die Spezielle Relativitätstheorie veröffentlicht, welche die unterschiedliche Naturbeschreibung aus der Sicht von Beobachtern zeigt, die sich mit konstanter Relativgeschwindigkeit zueinander bewegen. 1916 veröffentlichte Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie, die mit komplizierten mathematischen Methoden auch beschleunigte Beobachter berücksichtigt und die Schwerkraft miteinbezieht.

Aber Theorien müssen nicht nur entwickelt und formuliert, sondern durch Experimente oder Beobachtung bestätigt werden. Dass dies nicht immer einfach ist und auch an äußeren Umständen scheitern kann, davon handelt die folgende Geschichte. Darin spielt das Naturphänomen der totalen Sonnenfinsternis eine zentrale Rolle. Deshalb hierzu einige grundlegende Informationen.

Bei einer totalen Sonnenfinsternis schiebt sich der Mond in der Neumondphase vor die Sonne. Beide stehen dann in einer Richtung. Da der Mond 400-mal kleiner als

die Sonne ist, aber auch 400-mal näher bei der Erde steht, erscheinen beide Himmelskörper von der Erde aus gesehen fast gleich groß (mit etwa 30 Winkelminuten Durchmesser). Da die Mondbahn zur Umlaufbahn der Erde um die Sonne um  $5^\circ$  geneigt ist, steht der Neumond meist über – oder unterhalb der Sonnenscheibe. Wäre dies nicht der Fall, müsste sich bei jedem Mondumlauf um die Erde (also jeden Monat) eine Sonnenfinsternis ereignen. Real sind aber nur etwa zweimal pro Jahr weltweit die Bedingungen für eine Sonnenfinsternis gegeben.

Während der Sonnenfinsternis wirft der Mond einen kleinen Schattenfleck auf die Erde. Befindet man sich im Kernschattenbereich, verdeckt der Mond die Sonne total, im Halbschatten nur teilweise. Der Kernschattenfleck erreicht auf der Erdoberfläche maximal einen Durchmesser von 273 Kilometern, typische Durchmesser sind aber zwischen 100 und 200 Kilometer. Am Zentralpunkt überstreicht der Kernschattenfleck die Erde mit etwa 2500 Kilometern pro Stunde. Für einen bestimmten Ort dauert es maximal sieben Minuten, bis der Kernschatten über ihn hinweggerast ist. Die typische Dauer beträgt aber nur etwa

Durch die Ablenkung der Lichtstrahlen im Schwerefeld der Sonne erscheinen Sterne in ihren Positionen etwas von der Sonne weg nach außen verschoben.



zwei bis fünf Minuten. Es kann hier nicht auf alle Phänomene, die während einer totalen Sonnenfinsternis auftreten, eingegangen werden. Wichtig für unsere Betrachtungen aber ist, dass während einer totalen Sonnenfinsternis der Himmel um die Sonne fast nachtdunkel wird und die Korona (Strahlenkranz) der Sonne sowie hellere Sterne am Himmel sichtbar werden. Dieses Sichtbarwerden der Sterne während der totalen Sonnenfinsternis rückte 1911 ins Blickfeld der Physiker und Astronomen.

Einstein schrieb im Juni 1911 über eine Möglichkeit, seine noch nicht abschließend formulierte Allgemeine Relativitätstheorie experimentell nachzuweisen: »Es ergibt sich nämlich, dass Lichtstrahlen, die in der Nähe der Sonne vorbeigehen, durch das Gravitationsfeld derselben nach der vorzubringenden Theorie eine Ablenkung erfahren, so dass eine scheinbare Vergrößerung des Winkelabstandes eines nahe an der Sonne erscheinenden Fixsternes [...] eintritt. [...] Ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl erleidet demnach eine Ablenkung vom Betrage  $4 \times 10^{-6} = 0,83$  Bogensekunden. Um diesen Betrag erscheint die Winkeldistanz des Sterns vom Sonnenmittelpunkt durch die Krümmung des Strahls vergrößert. Da die Fixsterne der der Sonne zugewandten Himmelspartien bei totalen Finsternissen sichtbar werden, ist diese Konsequenz der Theorie mit der Erfahrung vergleichbar. [...] Es wäre dringend zu wünschen, dass sich Astronomen der hier aufgerollten Frage annähmen.« Da die Verfinsternis der Sonne nur einige wenige Minuten dauert und in dieser wertvollen Zeit möglichst viele Sternpositionen zu ermitteln waren, bot sich als einzige Messmethode die fotografische Dokumentation an, bei der das gesamte Erscheinungsbild der Sterne um die Sonne festgehalten wird. Man benötigt hierzu sowohl in der Nähe der Sonne helle Sterne, die nicht von der Korona überstrahlt werden, als auch etwas entfernt davon stehende Sterne ausreichender Helligkeit, die als Bezugsterne bei der Messung dienen können. Zum Nachweis der Veränderung der Sternpositionen durch die Sonnenmasse musste man diese Aufnahmen mit Fotos vergleichen, welche Monate vor oder nach der Finsternis nachts von derselben Stelle des Himmels mit denselben Sternen gemacht worden waren. Der messtechnische Vergleich der Fotoplatten erfolgte mit einem Plattenmessgerät.



Adolf Miethe, Fotochemiker an der Königlich Technischen Hochschule Berlin.

Dieses besteht aus einem Messmikroskop, das x-y-Koordinaten mit hoher Präzision ermitteln kann. Die Positionen identischer Sterne mussten nach der Einstein'schen Theorie auf den Fotoplatten voneinander abweichen und zwar umso stärker, je näher der betreffende Stern bei der Sonne stand. Der Winkel der Positionsunterschiede sollte 1,76 Winkelsekunden direkt am Sonnenrand betragen. Das ist etwa der Winkel, unter dem eine Ein-Euro-Münze in einer Entfernung von drei Kilometern erscheint. Die nächste Möglichkeit, die von Einstein angeregte Beobachtung zu machen, bot die totale Sonnenfinsternis vom 21. August 1914. Am 25.6.1913 schrieb Einstein hoffnungsfroh: »Nächstes Jahr bei der Sonnenfinsternis soll sich zeigen, ob die Lichtstrahlen an der Sonne gekrümmt werden, ob [...] die zugrunde gelegte fundamentale Annahme von der Äquivalenz von Beschleunigung des Bezugssystems einerseits und Schwerefeld andererseits wirklich zutrifft.« Die von den Astronomen geforderte Messung war höchst anspruchsvoll und selbst Einstein glaubte wohl nicht uneingeschränkt an diese Möglichkeit.

Am 14. Oktober 1913 schrieb Einstein an den amerikanischen Astronomen George Ellery Hale (1868–1938): »Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfeld eine Deviation erfahren. [...] Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung  $0,84''$  betragen und wie  $1/R$  abnehmen ( $R$  = Entfernung vom Sonnenmittelpunkt). Es wäre deshalb von größtem Interesse, bis zu wie grosser Sonnennähe helle Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrößerungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.« Das kann nur heißen, dass Einstein an der Möglichkeit der Messung während einer totalen Sonnenfinsternis zweifelte und parallel zu seinen ursprünglichen Überlegungen auch die Möglichkeit auslotete, Sternpositionen direkt am Taghimmel in Sonnennähe zu messen. Da das konzentrierte Sonnenlicht wegen des Brennglaseneffekts nicht direkt in das Teleskop gelangen darf, war dies für die Beobachter eine sehr gefährliche Überlegung.

National und international bereitete sich eine ganze Reihe von Astronomen darauf vor, die Sonnenfinsternis 1914 zu beobachten. Eine entscheidende Frage bei der Planung war, wohin im Finsternispfad man reisen sollte

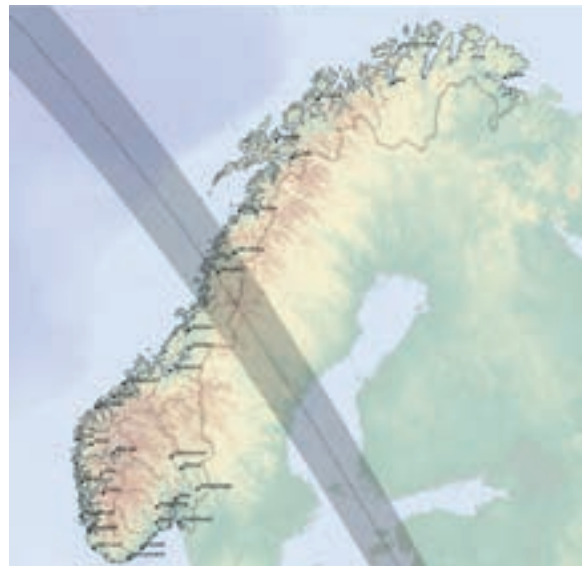
und welche Wahrscheinlichkeit dort gegeben war, dass gutes Wetter bzw. wolkenfreier Himmel herrschte und man die Finsternis überhaupt beobachten konnte. Zwei Wissenschaftler trafen in Berlin ihre Vorbereitungen. Erwin Finlay Freundlich (1885–1964) von der Berliner Universitätssternwarte hatte sich schon früh für diese Aufgabe begeistert. Er stand mit Einstein zunächst in schriftlichem Kontakt und konnte mit dessen Hilfe die Finanzierung einer geplanten Expedition nach Russland sichern. Da Einstein im Frühjahr 1914 nach Berlin übersiedelte und einen Ruf an die Preußische Akademie der Wissenschaften und die Universität Berlin angenommen hatte, lernten sich beide noch vor der Finsternis auch persönlich kennen und schätzen. Parallel hierzu plante noch ein zweites Berliner Team eine Expedition in die Totalitätszone der bevorstehenden Finsternis.

### Reise zu den Sieben Schwestern

Initiator und Leiter dieses Projekts war Adolf Miethe (1862–1927), Fotochemiker an der Königlich Technischen Hochschule Berlin, dessen Interesse an der Sonnenfinsternis der Astrofotografie entsprang. Miethe hat die Messung zum Nachweis der Allgemeinen Relativitätstheorie in seinen Veröffentlichungen nie erwähnt. Auch persönliche Kontakte zu Einstein sind nicht belegt. Das Fehlen eines Kontakts mag mehrere Gründe haben. Einstein konzentrierte sein Interesse wohl ganz auf die Expedition der Universität Berlin, welche von Freundlich geleitet wurde. Miethe war an der Technischen Universität beschäftigt, welche die vollständige akademische Anerkennung 1914 noch nicht erreicht hatte.

Die Gründung der Königlich Technischen Hochschule zu Berlin war ein wichtiger Schritt für die technisch-akademische Ausbildung. Erst 1899 sprach Kaiser Wilhelm II. den technischen Hochschulen in Preußen als ersten technischen Hochschulen im Deutschen Reich das Recht zu, den Dokortitel zu verleihen. Miethe kam von der praktisch-technischen Seite und war kein akademisch anerkannter Astronom. Dennoch war das Hauptinstrument seiner Expedition genau darauf ausgelegt, das lichtschwache Umfeld der Sonne in einem Blickfeld von mehreren Sonnendurchmessern fotografisch zu dokumentieren!

Der Finsternispfad der totalen Sonnenfinsternis vom 21.8.1914 über Norwegen.



### Zum Weiterlesen

A. Miethe, B. Seegert, F. Weidert, *Die totale Sonnenfinsternis vom 21. August 1914*, Braunschweig 1916.

H. Seibt (Hrsg.), *Adolf Miethe (1862–1927) Lebenserinnerungen*, Reihe *Acta Historica Astronomiae* Vol. 46, Frankfurt 2012.

A. Brachner, G. Hartl, C. Sichau (Hrsg.), *Abenteuer der Erkenntnis. Albert Einstein und die Physik des 20. Jahrhunderts*, München 2005.

J. Renn (Hrsg.), *Albert Einstein. Einsteins Leben und Werk im Kontext*, Berlin 2005.

J. Renn, *Albert Einstein. Hundert Autoren für Einstein*, Berlin 2005.

Über die Anfänge des Projekts schreibt Miethe: »Im Sommer 1911 wurde an der Sternwarte der Königlich Technischen Hochschule Berlin der Entschluss gefasst, die Beobachtung der totalen Sonnenfinsternis 1914 vorzubereiten.« Und weiter: »... reifte in mir der Plan, mich zur Ausführung des Unternehmens mit dem Goerz-Werk in Verbindung zu setzen, dessen gerade damals aufblühende astronomische Abteilung an einer solchen Forschungsreise Anteil nehmen musste. [...] Bei Besprechungen mit den Leitern und wissenschaftlichen Mitarbeitern der Optischen Anstalt C. P. Goerz A. G. [Anm.: Unternehmen von Carl Paul Goerz (1854–1923), Berlin] im Herbst 1912 über die Konstruktion der erforderlichen Instrumente ergab sich dortseits die erfreuliche Geneigtheit einer weitgehenden Unterstützung unserer Pläne. [...] Und so begannen bereits 1912 äusserst eingehende Vorberatungen, die sich wesentlich auf zwei Dinge erstreckten: die Art der zu benutzenden Beobachtungsmittel und die Auswahl des Standortes.«

Zum Verlauf des Finsternisschattens und der Frage des Beobachtungsstandorts schreibt er: »Der Finsternisstreifen musste nach der Vorrechnung vom Eismeer kommend unmittelbar südlich des Polarkreises die norwegische Küste erreichen, die Hochgebirge auf der Wasserscheide nach Schweden überqueren [...] und über die Ostsee nach Riga streichen, über russischen Boden Kiew und die Krim überlaufen, durch das Schwarze Meer bei Trapezunt Kleinasien erreichen und über Persien zum Indischen Ozean gelangen. Die Verfinsterung fiel für die norwegische Küste um die Mittagsstunde des genannten Tages, während das Ereignis auf der Krim sich etwa um vier nachmittags abspielen würde.«

Obwohl für Russland und die Krim wesentlich bessere Wetterprognosen als für Norwegen zu erwarten waren, setzte sich Miethe vehement für den nördlichen Beobachtungsstandort ein. Dass er damit richtig lag, sollte sich drei Jahre später auf tragische Weise zeigen. Miethe erinnerte





Der Vermessungsingenieur Stephan von Nieber mit Theodolit vor dem Bergpanorama der Sieben Schwestern im Jahr 1914. Rechts: Derselbe Standort im Sommer 2012.

sich 1916: »... dass diese damalige Hartnäckigkeit für uns alle einen Glücksfall darstellte [...]. Wäre ich damals der Flut der Gegengründe, die mir vorgehalten wurden, ausgewichen, so sässen meine jüngeren Mitarbeiter in jedem Fall, vielleicht wir alle noch heute im schwarzen, heiligen Russland oder in Sibirien und unsere kostbaren Apparate, die jetzt in Nordnorwegen, zwar feucht, aber verhältnismässig sicher schlummern, hätten längst ihren Weg in russische Munitionsfabriken und Kanonengiessereien gefunden.«

Schließlich fiel Miethes Wahl auf einen Ort auf einer der norwegischen Küste vorgelagerten Schäreninseln: »Die Finsternislinie überquerte nämlich [...] gerade die Mitte der grossen Insel Alsten in Helgeland, ein langgestrecktes Eiland, das seinerseits in der Richtung seiner Längsausdehnung von einem riesigen, siebengipfligen Alpenzug durchsetzt wird, dessen schroffe, matterhornähnliche Gipfel unter dem Namen der Sieben Schwestern allen Nordlandreisenden bekannt sind. Diesem Gebirgszug war westlich allerdings ein gut bevölkertes Vorland vorgelagert, das in der Nähe des Städtchens Sandnaesjoen einen geeigneten Beobachtungsplatz, der auch von den Postschiffen angefahren wurde, gewährte.«

Übrigens: Noch heute nutzen die Schiffe der norwegischen Hurtigruten den Hafen von Sandnessjøen. Auf ihrer Nord-Süd-Route längs der Küste bieten die Sieben Schwestern den Touristen einen spektakulären Anblick.

Neben dem Standort war die zweite wichtige Frage das Beobachtungsprogramm und damit die technische Ausstattung der Expedition. Miethe hatte als Fotochemiker eine klare Präferenz: »Dem Arbeitsbereich der Sternwarte der Technischen Hochschule entsprechend, wurde wesentlich eine Heranziehung der fotografischen Methoden zur Beobachtung der Finsternis ins Auge gefasst.«

Vom Herbst 1912 bis zum Frühsommer 1914 wurden bei Goerz folgende Instrumente entwickelt und gebaut: Eine Horizontalkamera, mehrere Heliostaten zur

genauen Lenkung des Sonnenlichts, ein 200 Millimeter Astrograf, eine 120 Millimeter Doppelkamera, ein Flashspektrograf, ein Spaltspektrograf, eine Vierfach-Fotometerkamera, eine Dreifarben-Astrokamera und schließlich als größtes Instrument ein Teleskop mit aplanatischem Linsenspiegel. Dies ist ein parallaktisch montiertes Fernrohr, das man sowohl als Kamera als auch als Cassegrain-Teleskop visuell einsetzen kann. Die optische Abbildung übernimmt dabei eine Zweifachlinse mit 40 Zentimeter Durchmesser, deren hinteres Ende verspiegelt ist. Mit dieser Konstruktion erhoffte man, sowohl die Vorteile eines Spiegelteleskops als auch die eines Linsenfernrohrs ausnützen zu können.

Über die Zielsetzung des Geräts schrieb Miethe: »... war zu erwarten, dass infolge der großen absoluten Öffnung des Linsenspiegels [...] auch lichtschwache, siderische Objekte in der Nähe der Sonne noch abgebildet werden.« Dieses Instrument war sehr gut dazu geeignet, den von Einstein erhofften Effekt der Positionsänderung von Sternen in Sonnennähe zu belegen. Die Vergleichsaufnahmen derselben Himmelsgegend ohne verfinsterte Sonne konnte man nach der Finsternis in Ruhe anfertigen.

### Vorbereitung für das große Ereignis

Mitte Juni 1914 begann die Verpackung der Instrumente. In insgesamt vier Sendungen sollten sie nach Norwegen gebracht werden. Wie umfangreich die Expedition war, sieht man daran, dass schon die erste Sendung 44 Kisten umfasste. Insgesamt acht Beobachter und Techniker sollten die Beobachtungen und Messungen in Norwegen durchführen. Wichtige Rollen neben Miethe spielten dabei der Optiker Franz Weidert (1878–1954) von der Firma Goerz sowie Bruno Seegert (1885–1953), Fotochemiker von der Technischen Hochschule Berlin. Am 4. Juli trat die Hauptgruppe der Expeditionsteilnehmer die Schiffsreise in Hamburg an, am 11. Juli erreichte sie Sandnessjøen. Man hatte nun gut einen Monat Zeit, die Vorberei-



Die Expeditionsteilnehmer salutieren vor der deutschen Flagge. (Foto aus: H. Seibt, Hrsg., *Adolf Miethe (1862 – 1927) Lebenserinnerungen*, Reihe *Acta Historica Astronomiae* Vol. 46, Frankfurt 2012.

tungen für das große Ereignis zu treffen: Auspacken der Ausrüstung, Aufbau von Schutzhütten für die Instrumente, Vermessung des Geländes und Festlegung der exakten Mittagslinie, Einrichtung einer Funkstation zur wissenschaftlichen Kommunikation und Empfang der Zeitsignale, Aufbau und Justierung der Beobachtungsinstrumente und schließlich das Einüben der erforderlichen Handgriffe zur Durchführung des Beobachtungsprogramms während der gut zweiminütigen Finsternis.

Wichtig war auch die Kontaktaufnahme mit der örtlichen Verwaltung und der Bevölkerung. Ohne wohlwollende Unterstützung vor Ort war ein derartiges Unternehmen nicht durchzuführen. Am 13. Juli hatte man alle Kisten vom Hafen zur Beobachtungsstation transportiert. Es folgte nun die intensive Phase des Aufbaus der Instrumente. In der Nacht vom 20. auf den 21. Juli war die Funkstation fertig und man empfing erste Zeitsignale von Norddeich und dem Eiffelturm in Paris.

Doch dann kam es zu ersten Schwierigkeiten: »Am 25. Juli in der Frühe kam Dr. Weidert mit weiteren 18 Kisten. [...] Er brachte unter anderem Teile des 40-cm-Linsenspiegels mit, die in mehreren Kisten verpackt waren. Schon das Ausladen dieser Kisten machte am Bollwerk große Schwierigkeiten. Es konnte festgestellt werden, dass die Überführung zur Station mit den vorhandenen Transportmitteln unmöglich war. Der Rollwagen war dieser Last nicht gewachsen.« Das komplette Teleskop wog immerhin 900 Kilogramm. Man entschloss sich daher, das Instrument direkt am Hafen am »Abhang eines Felsrückens« aufzustellen. Die nachfolgenden Ereignisse verhinderten dies allerdings.

Zum Verständnis des weiteren Geschehens muss man sich nun einige Daten ins Gedächtnis rufen: 28. Juni 1914: Attentat auf den österreichischen Thronfolger Erzherzog Ferdinand und dessen Ehefrau in Sarajevo. Anfang Juli: Deutschland sagt Österreich-Ungarn seine bedingungslose politische und militärische Unterstützung zu. 28. Juli: Kriegserklärung Österreich-Ungarns an Serbien. 1. August: Deutsche Kriegserklärung an Russland. 3. August: Deutsche Kriegserklärung an Frankreich. 4. August: Großbritannien tritt in den Krieg gegen Deutschland ein. Norwegen erklärte mit Dänemark und Schweden in dem Konflikt seine Neu-

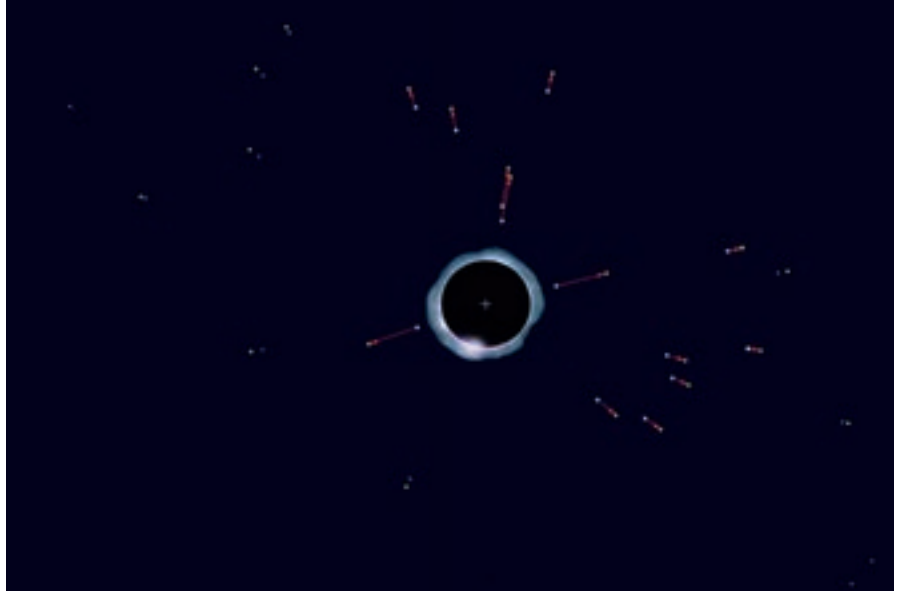
tralität. Miethe schrieb über die Situation Ende Juli 1914: »Schließlich verblasst so weit von der Heimat das Interesse für die kleinen politischen Ereignisse.« Und weiter: »Wie ein Blitz aus heiterem Himmel traf uns daher ein Telegramm [...] am 30. Juli, das [...] kriegerische Verwicklungen Deutschlands unzweifelhaft andeutete.« Einen Tag später erhielt Miethe »... am 31. Juli die kurze Nachricht: alle [Anm.: noch fehlenden] Instrumente heute abgesandt [...], europäische Lage ruhig«. Dass man immer noch auf einen guten Fortgang der Expedition hoffte, besagt auch eine Notiz vom folgenden Tag: »Der Expedition war je eine deutsche und norwegische Flagge gestiftet worden, und diese wurden feierlich am 1. August vormittags in Anwesenheit sämtlicher Teilnehmer am Stationsgebäude gehisst.«

### **Unerfreuliche Nachrichten**

Doch am 2. August wurden die besorgniserregenden Informationen zur Gewissheit: »... brachte der Vormittag über die politische Lage plötzliche und schwerwiegende Nachrichten. v. Nieber [Anm.: Generalleutnant, Vermessungsingenieur der Gruppe] wurde drahtlich dringend nach Deutschland beordert. [...] In Sandnessjöen wurde die deutsch-österreichische Mobilisierung gegen Russland bekannt. [...] Und die bisher mehr als gelassenen Einwohner gerieten in unbeschreibliche Aufregung.« Das Resultat war, dass die Expeditionsteilnehmer v. Nieber, Weidert, Lang und Jaeckel sofort abreisten.

Da Miethe und einige andere Teilnehmer nicht militärpflichtig oder als untauglich eingestuft waren, beschloss das Restteam, auf alle Fälle in Sandnessjöen zu bleiben und nur noch ein reduziertes Beobachtungsprogramm durchzuführen. Dies bedeutete aber leider das Aus für das große Linsenspiegel-Teleskop: »Vereinbart wurde aber schließlich, die verfügbaren geringen Kräfte nicht zu zersplittern und die schwierige und zeitraubende Aufstellung des Linsenspiegels, der zudem zur Benutzung mindestens zwei geschulte Beobachter gebraucht hätte, zu unterlassen.« Und: »Wir vier Zurückbleibenden setzten unsere Arbeiten mit verdoppeltem Eifer fort.«

Große Bedenken hatte man wegen des Betriebs der Funkstation. »... erwarteten wir jeden Tag das Einlaufen



eines behördlichen Verbotes der Benutzung der drahtlosen Station.« Und es »... konnte unmöglich die Regierung eines neutralen Staates die Benutzung einer drahtlosen Station durch Bürger einer kriegsführenden Partei gestatten«. Miethe war deshalb nicht überrascht, als ihm am 9. August eine norwegische Regierungsverfügung überbracht wurde. Doch der Inhalt war nicht so dramatisch, wie befürchtet. Man durfte die Funkstation unter der Aufsicht eines norwegischen Regierungsbeamten für wissenschaftliche Zwecke weiterbetreiben.

Am 17. August waren alle Vorbereitungsarbeiten erledigt und man konnte dem Finsternistag, mit Anspannung aber auch einer gewissen Enttäuschung entgegensehen. Wenigstens am Finsternistag hatte das Expeditionsteam Glück: »... der Himmel war tiefblau und vollkommen wolkenlos ...« Miethe absolvierte mit seinen verbliebenen Leuten ein reduziertes Beobachtungsprogramm, das die fotografische Dokumentation der Fixsternpositionen um die Sonne leider nicht beinhaltete. Nach dem Abbau der Station verließ Miethe mit seinem Team am 26. August Sandnessjøen und kam am 30. August wohlbehalten in Berlin an. Die gesamte Ausrüstung musste er allerdings in Norwegen zurücklassen. Zu deren weiteren Verbleib schrieb er 1916: »Die Rückführung der 45 Kisten mit allen Geräten und Unterlagen kann erst 1918 in die Wege geleitet werden.«

Gescheitert ist Miethe nicht an der Bestätigung von Einsteins Theorie. Dies hatte er nie als Hauptziel definiert. Gescheitert ist er aber mit dem Linsenspiegel-Teleskop. Es blieb in Kisten verpackt und konnte nicht zeigen, was es kann. Das Teleskop mit dem aplanatischen Linsenspiegel kam nach dem Krieg zurück nach Deutschland und im Oktober 1922 in die Sammlung des Deutschen Museums. Heute steht es perfekt restauriert in der Oststernwarte des Deutschen Museums, wird täglich für Himmelsbeobachtungen der Besucher eingesetzt und hat auf diese Weise ein positives Schicksal mit hoher öffentlicher Beachtung erfahren, wie es nur ganz wenigen Teleskopen dieser Zeit vergönnt ist.

Miethe schrieb 1916 über die ereignisreichen Wochen des August 1914: »Die Schicksale der zahlreichen Sonnenfinsternisexpeditionen 1914 sind unerfreulich. Die

Positionsänderungen der dreizehn sonnennahen Sterne während der totalen Sonnenfinsternis von 1919. Die Änderungen der Positionen sind in der Grafik tausendfach überhöht dargestellt.

Expeditionen nach Südrussland scheinen sämtlich durch schlechtes Wetter vollkommen behindert worden zu sein. Die italienische Expedition in Feodosia hatte während der Finsternis klaren Himmel. Die deutschen Expeditionen sind dort nicht einmal dazu gekommen, ihre Apparate auszupacken, da die zugesicherte russische Gastfreundschaft der Kriegsstimmung des Sommers 1914 sich nicht gewachsen zeigte. Unsere Expedition nach der Insel Alsten in Norwegen wurde durch die Kriegserklärung ebenfalls stark beeinträchtigt, vom Wetter jedoch außerordentlich begünstigt. Sie brachte Resultate nach Hause, wenn sie auch nur einen kleinen Teil ihres umfangreichen Programms ausführen konnte.« Und Einstein musste am 19. August 1914 sorgenvoll feststellen: »Mein guter Astronom Freundlich wird in Rußland statt der Sonnenfinsternis die Kriegsgefangenschaft erleben.«

Im November 1915 veröffentlichte Einstein die endgültige Fassung der Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Eine abschließende Darstellung mit dem Titel *Die Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie* folgte im Mai 1916. Den vier Jahre vor der endgültigen Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein vorhergesagten Wert der Ablenkung am Sonnenrand von 0,83 Bogensekunden musste er 1915 zu 1,76 Bogensekunden korrigieren: Er hatte in seiner noch unvollständigen Theorie die Krümmung des Raumes durch die Sonne nicht berücksichtigt.

So unerfreulich und teilweise tragisch die Geschehnisse im August 1914 waren, gab es für die Allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins doch ein erfolgreiches Ende. Am 29. Mai 1919 ereignete sich die nächste totale Sonnenfinsternis, die für den Einstein'schen Nachweis geeignet war. Der schmale Pfad der Totalität führte dabei von Südamerika über den Atlantik bis nach Afrika. Auf der Insel Principe im Golf von Guinea 120 Kilometer vor der Küste Westafrikas führten Arthur Stanley Eddington (1882–1944) und Edwin Turner Cottingham (1869–1940) von der englischen Royal Society und der Royal Astronomical Society erfolgreich die 1914 gescheiterten Beobachtungen durch. Wenige Tage nach der Bekanntgabe der Ergebnisse im November 1919 war Albert Einstein zum berühmtesten Naturwissenschaftler seiner Zeit geworden. ■■■



DER AUTOR

**Dipl. Ing. FH Gerhard Hartl** studierte technische Physik an der Hochschule München sowie Neuere Geschichte und Geschichte der Naturwissenschaften an der Ludwigs-Maximilians-Universität München. Er war über 30 Jahre Kurator für Astronomie, Planetarium und Sternwarte am Deutschen Museum und ist seit 2017 im Ruhestand.

*Weniger CO<sub>2</sub> sollen die riesigen Schiffe auf den Weltmeeren künftig emittieren. Auf der Suche nach alternativen Antrieben setzen Wissenschaftler und Techniker auf Altbewährtes.*

Von Jobst Broelmann



## Windkraft für den Klimaschutz

Das Scheitern eines Schiffes vor der Küste. Der Mythos von der Übermacht und der Grenzenlosigkeit der Meere führte zu einem rücksichtslosen Umgang mit diesem größten Teil der Erde. Gemälde Jan Bruegel d. J., ca 1625.

**S**cheitern, das bedeutet ursprünglich ein katastrophales Ereignis: Das Zerschlagen eines Schiffes an der Küste zu Scheitern. Eine der Ursachen dieses Scheiterns – Unsicherheit in der Navigation – löste im 17. Jahrhundert intensive Forschungen sowie eine Fülle von Vorschlägen aus, die erfolgreich zu Verfahren der genauen geografischen Längenposition führten.

Auch der Plan, den Ausstoß von CO<sub>2</sub> auf den Meeren bis 2050 um die Hälfte zu reduzieren, soll ein Scheitern abwenden, diesmal allerdings eines von globalem Ausmaß. Er beinhaltet die Abkehr von fossilen Treibstoffen und regt eine Überprüfung bereits vorgeschlagener alternativer Antriebe an, deren Prototypen längst im Museum versammelt sind.

### The Endeavour of »zero emission«

Die historische Erschließung der Erde über ihre Meere hatte vom lokalen Energieangebot profitiert, von der direkten Umsetzung der Windströmung in Vortrieb, ohne Brennstoff und Abgase. Es herrschte der Idealzustand einer »zero emission« – von den verkarsteten Landstrichen und der Abholzung der Wälder für den Holzschiffbau einmal abgesehen. Die Entdeckungsfahrten eines Columbus, Magellan oder Cook wären zu ihrer Zeit mit einem Dampfer nicht möglich gewesen. Lange waren die weißen Flecken des Globus nur mit Segelantrieb zu erreichen und auch wieder zu verlassen. Noch in den 1920er Jahren war die deutsche Meteor-Expedition in der Atlantikforschung, auch aus Kostengründen, auf eine Hilfsbesegelung angewiesen. James Cook, der auf den Kohleschiffen (Collier) gelernt hatte, die im 18. Jahrhundert bereits Millionen Tonnen zur Versorgung Londons lieferten, bestand darauf, für seine Reise in den Fernen Osten einen Collier zu verwenden, robust und flachgehend. Die *Endeavour* bewahrte ihn vor dem Scheitern auf dem Great Barrier Reef und ermöglichte es ihm, seine Forschungsreise und eine Erdumsegelung zu vollenden.

Allerdings hatte das lange Monopol des Segelschiffs wenig zu seiner qualitativen Vervollkommnung beigetragen. Es herrschte das Prinzip der Addition und der Anhäufung der Segel und Masten, die mit der Einführung des Stahls noch weiter fortgesetzt wurde. Vom Stand eines Wikingerschiffs aus betrachtet, waren einzelne Segel übereinandergetürmt worden, soweit, bis fast 1900 Matrosen bis in 60 Meter Höhe aufentern mussten, um schweres Segeltuch nach oben an die Rah zu »raffen« – reffen. Einzelne, herausragende Innovationsvorschläge, bereits um 1800, mit einer geschlossenen Segelfläche für besseres Kreuzen, konnten sich nicht behaupten und scheiterten an der Tragheit der Zunft.

Die Dampfmaschine entstand im Umfeld und im Überschuss der Bergwerke: an der Quelle fossiler Energie. Der britische Ingenieur Isambard Brunel, der die Reise nach Australien erstmals mit einem Dampfer durchzuführen plante, hatte nun den Übergang von der lokalen Energiewandlung zur eigenen Energieversorgung zu meistern, entgegen der Ansicht, es könne nicht die Aufgabe eines



Rotorschiff *Barbara* (1926). Das Modell wurde 1927 von der Reichsmarine gestiftet. Beim Rotorschiff werden die Zylinder und die umgebende Luft durch Motoren in Rotation versetzt. Im Wind wird die Luftströmung auf der einen Seite schneller, auf der anderen Seite langsamer, wie bei einem Flugzeugflügel. Der entstehende Druckunterschied ist etwa zehnmals größer als bei einem Segel mit der gleichen Fläche.

Schiffes sein, Kohle zu transportieren, um sie gleich an Bord zu verheizen. Er scheiterte an den Problemen seiner *Great Eastern*, doch fand das überdimensionierte Schiff ein neues Aufgabengebiet in der globalen Kommunikation, in der es als Kabelleger für Transatlantikkabel einspringen konnte. Im folgenden Technikfortschritt dieses sprunghaften »trial and error« wurde das Scheitern im übertragenen Sinn eine unmissverständliche Erfahrung, die es zu beherzigen und für weitere Schritte zu analysieren galt, in der Abwandlung des Dichterwortes: »und jedem Scheitern wohnt ein neuer Anfang inne«. Doch konnten auch neue Ausgangsbedingungen die Basis der Technologien zu ihren Gunsten verändern.

Schnell steigerten sich die Leistungen der Schiffsmaschinen, um die nationale, irrationale Sucht nach Geschwindigkeit zu befriedigen. So benötigte die *Mauretania*, Baujahr 1907, etwa 60 Megawatt, um ihre Masse von 45 000 Tonnen mit fast 50 Kilometern pro Stunde zu bewegen. Geschwindigkeit auf See ist teuer, denn der Leistungsbedarf steigt mit ihrer 3. Potenz. Daher war die folgende *Titanic*, anders als oft behauptet, nicht das Opfer eines Rekordversuches, sondern in ihrer Leistung und Fahrt bewusst reduziert, gegenüber der älteren *Mauretania* um etwa 20 Megawatt. Damit war sie eines der ersten Beispiele für »slow steaming«, nach heutiger Bezeichnung. Dass die Abgaseinrichtungen, die Schornsteine, auch als Zeichen der Leistung und Macht dienten, zeugt vom Selbstverständnis des Maschinenzeitalters. Immerhin sicherte der »Vierschornsteiner« das »Fünftageschiff« und die Zuverlässigkeit im Fahrplan des Atlantikverkehrs.

Für einige Ingenieure lag es nahe, etwa für den Transport von Massengütern, den Status der Großsegler von etwa 3000 Tonnen Tragfähigkeit mit den verfügbaren tech-



Das mechanische Entwurfsmodell des Dynariggs, ein Relikt der Versuche in Hamburg, ca. 1962. Die Segel werden zum Mast gerefft.

nischen Neuerungen zu beleben. Sie rechneten bei möglichst weitgehender Rationalisierung und der Nutzung des Funks zur Kommunikation von Wetterdaten, unter Verwendung einer Hilfsmaschine von nur etwa 300 Kilowatt noch eine Chance für diese Hybridlösung aus. Ähnlich erhielt auch der relativ kleine Ewer *Maria HF 31*, gebaut 1880, noch 1924 einen 22 Kilowattmotor (der leider vor seiner Aufstellung im Deutschen Museum entfernt wurde).

Trotz solcher unterstützender Möglichkeiten kam die kommerzielle Segelschifffahrt, auch durch geopolitische Gründe bedingt, zum Erliegen. Gerade zu dem Zeitpunkt, als die Fliegerei mit Hilfe der Aerodynamik aufblühte, die von Physikern wie Ludwig Prandtl in der Aerodynamischen Versuchsanstalt in Göttingen erforscht wurde. So brauchten wendige Erfinder wie Anton Flettner um 1923

nur deren Ergebnisse zu ernten und das Tragflügelprinzip und den Rotor mit dem Magnuseffekt als grandiose Neuheiten des Schiffsantriebs zu verkünden. Im folgenden Prioritätenstreit assistierte der Hobbysegler und Patentexperte Albert Einstein dem Kollegen Ludwig Prandtl, der »so gut wie die ganze von Flettner realisierte Konstruktion bereits erdachte und ausführte«. Dem Verfahren konnte dieser Beistand jedoch keinen günstigen Wind vermitteln und der »sensationelle Erfolg«, den Prandtl voraussah, wurde von den zwei mit Rotoren ausgestatteten Schiffen in der folgenden Weltwirtschaftskrise nicht erreicht. Ein Modell kam in das Deutsche Museum, einmal mehr der Hort und Wartesaal ungenutzter schöpferischer Fantasie.

Ein nach dem Zweiten Weltkrieg in Hamburg neu gegründetes Institut für Schiffbau setzte die Arbeit Prandtls fort. In einem Windkanal wurden Modelle und Varianten der Großsegler gemessen, wonach der Ingenieur Wilhelm Pröls einen Entwurf vorschlug, in dem die einzelnen Rahsegel zu einer gewölbten, glatten Fläche geschlossen waren, das Dynarigg. Das System sollte doppelt so effizient sein wie konventionelle Rahsegel und von einer Person bedient werden können, versprochen Messungen und Modelle. Doch zu Lebzeiten des Verfechters wurde das Konzept nicht verwirklicht. Auch dieses Entwurfsmodell fand den Weg ins Museum.

Die Suche nach »günstigen« Ressourcen ging in alle Richtungen. Während in Hamburg noch das Dynarigg entwickelt wurde, lief in Geesthacht, ein wenig elbaufwärts, ein Forschungsreaktor zur Probe, der, mit unvergleichbarem Aufwand betrieben, als Wärmequelle die Nutzung der Kernenergie in Handelsschiffen ermöglichen sollte. Der Frachter *Otto Hahn*, der nach längerer Bauzeit 1968 in Fahrt kam, hatte allerdings zunächst eines mit den Windjammern gemeinsam: Die Passagen durch Suez- und Panamakanal waren ihm verwehrt, aus Sicherheitsgründen. Er beendete 1979 sein Forschungsprogramm. Da er in der Praxis unrentabel war, wurde er »entkernt«, und fuhr noch dreißig Jahre konventionell mit einem Dieselmotor. Das Projekt ist jedoch lange noch nicht abgeschlossen, wie die Bezeichnung »Zwischenlager« für die Brennstäbe verrät. Eine Option ziviler Atomfrachter steht, zumindest in Deutschland, nicht zur Debatte.

Auf der Ostseefähre *Viking Grace* erhielt der Flettnerrotor 2018 eine zweite Chance.

Das Beispiel zeigt nebenbei, dass inzwischen auch die Dampf- und Turbinenantriebsanlagen dem Dieselmotor weichen mussten, einem Spätzünder im Spektrum der Antriebe. Seine Entwicklung war selbst ein Muster für die Risiken des Scheiterns, bis zum rätselhaften Tod Rudolf Diesels im Ärmelkanal. Dessen Motor konnte aber noch im Ersten Weltkrieg seine »Tugenden« beweisen. Der geringe Verbrauch ließ weite Aktionsradien der Kriegsschiffe zu, was spätestens in den Panzerschiffen der 1930er Jahre einen Dieselmotor begründete. In Friedenszeiten war es dann der sparsame Allesfresser der Raffinerieabfälle, der den Frachtern die Bezeichnung »Müllverbrennungsanlagen« eintrug. Die Reeder achteten auf den Cent, nicht auf CO<sub>2</sub> oder die zahlreichen Gifte in den Abgasen. Doch diese sind heute erstmals das entscheidende Argument für den dringend bevorstehenden Wechsel.

In Phasen steigender Ölpreise, in denen Frachter die Fahrt drosselten, erschienen neuartige Windschiffe in den Technikmagazinen, wurden enthusiastisch neue Varianten wie das »wingsail« erwogen. (*Kultur & Technik* 1/2007, S. 16) Doch bis jetzt überstand kein Prototyp seine Erprobung. Das 21. Jahrhundert sah keine Wiederbelebung einer kommerziellen Segelschiffahrt, im Gegensatz zum Erfolg der Windkonverter an Land. Nur in der Kreuzfahrt konnte die »Romantik des Segels« verkauft werden. In der Bedienung zwar mechanisiert, aber ohne die Sensibilität eines Wetterroutings, immer noch auf die Stunde genau geplant. Zwar ist die Windenergie für die Segler kostenlos, die Nutzung hat jedoch ihren Preis. Die Entwicklung synthetischen Segeltuchs verlief nicht ohne Rückschläge, und auch dieses ist der UV-Strahlung und dem mechanischen Verschleiß ausgesetzt. Die Segel müssen laufend nach etwa vier Jahren ausgetauscht werden.

Als auch der konventionelle Antrieb und die Hydrodynamik in einem Forschungsprogramm für das »Schiff der Zukunft« seit 1980 systematisch weiter verbessert wurden, waren die schädlichen Emissionen und saurer Regen noch kein besonderes Thema. Eine »economy of scale« und physikalische Gesetze begünstigten das Größenwachstum der Frachter. So bewegt heute ein Containerschiff mit derselben Leistung und der Geschwindigkeit der *Mauretania* etwa das Fünffache an Masse.



### Frischer Seitenwind aus Silicon Valley?

Auf dem Experimentierfeld des Windantriebs blieben Segelyachten ein kostspieliges Steckenpferd. Tom Perkins, IT-Unternehmer mit fast unbegrenzten Ressourcen, verfiel dem Plan, sich eine fortschrittliche Yacht bauen zu lassen. Eigenwillen und reichlich Geld waren nötig, um sich gegen die Skeptiker durchsetzen zu können und beim *Maltese Falcon* das Dynarigg erstmals zu verwirklichen. Doch die Strategie, bei einer Superyacht mit dem Nimbus und Nutzen eines maritimen SUV, etwas zu präsentieren, was sich sonst niemand leisten konnte, bedeutete ein Scheitern des ursprünglichen Entwurfsziels: auch im scharfen Wettbewerb des Frachtenmarktes konkurrenzfähig zu sein. Kapitäne lobten zwar die Leistungen des Segelantriebs, verwiesen aber auf die Notwendigkeit einer guten IT-Mannschaft. Die aufwendig hergestellten Kohlefaser-

Blick in das Rigg des Kreuzfahrtschiffes *Royal Clipper*, fertiggestellt 2000. Als Neuerung werden die Segel in die Rahen eingerollt. Deutlich wird die zerklüftete, aerodynamisch ungünstige Takelage der konventionellen Großsegler.

Die Masten des Dynariggs des *Maltese Falcon* haben mit 60 Meter die Höhe der Windkonverter erreicht. Sie sind im Schiff drehbar gelagert.



Die Brennstoffzelle mit einer Leistung von sieben Kilowatt, wurde 1987 auf dem Tauchboot U1 (IV) gefahren. Sie basiert auf der Umkehrung der Elektrolyse des Wassers und erzeugt Strom und Wasser.

masten, deren Sicherheit durch ein eigens entwickeltes Kontrollverfahren überprüft werden mussten, waren nur für einen leichten Yachtrumpf ausgelegt und viel zu teuer. Bei schweren Frachtern sollten aber eher Stahlmasten eingesetzt werden.

Eine Hamburger Firma unternahm es, einen viermastigen Ecoliner als Autotransporter zu konzipieren (*Kultur & Technik* 3/2017, S. 30) und dabei auch dessen neues Image zu nutzen. Der in die Kritik manövrierte VW-Konzern war an einer Kampagne interessiert, seine schlechte CO<sub>2</sub>-Bilanz aufzufrischen und eine positive optische Präsenz auf dem Atlantik zu vermitteln, über den er pro Jahr mehr als eine halbe Million Autos exportiert. Auf einem Ecoliner sollten 3000 Autos verschifft werden. Nach langen Verhandlungen jedoch scheiterte das Projekt, denn VW zog es vor, auch beim Seetransport weiterhin im fossilen Bereich zu verfahren.

### Windkraft und Gas

Die Ankündigung der IMO (*Kultur & Technik* 1/2019, S. 21) im April 2018, den Ausstoß von CO<sub>2</sub> auf den Meeren bis 2050 um die Hälfte zu reduzieren, war überfällig und beim Pariser Abkommen 2015 noch ausgeklammert worden. Grotesk war bei den Verhandlungen, dass viele Reedereien bei ihrer Steuerflucht auf Inseln basieren, die als Erste vom Klimawandel bedroht sind, wie die Marshallinseln. Diese hatten »zero emissions« gefordert.

Weitere Bedingungen, der »sulphur cap«, reduzieren den Schwefelgehalt im Schweröl ab 2020. Zusätzlich sollen alle größeren Schiffe den Treibstoffverbrauch aufzeichnen. Der Anspruch ist enorm, da Prognosen bis 2050 besagen, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Schifffahrt weiter stark anwachsen werden. Zurzeit beträgt der Anteil der Schifffahrt am erdweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß etwa drei Prozent, bei einem niedrigen spezifischen Energieverbrauch des Seetransportes. Jener der anderen Schadstoffe liegt aber wesentlich höher.

Als Erstes böte sich die Senkung der Maschinenleistung an, das »slow steaming«, das sich für den Reeder unmittelbar auszahlt, aber höhere Transportkapazitäten fordert und dadurch den Effekt mindert. Es könnte jedoch auch einem zusätzlichen Windantrieb eine bessere Basis verschaffen, da der Fahrtwind als Gegenwind verringert wird. So erscheinen Flettnerrotoren vereinzelt auf den hohen Aufbauten, die prognostizierten Ersparnisse pendeln sich bei etwa 15 Prozent ein. Da aber die Leistungsdichte eines Diesels bei großen Schiffen kaum zu ersetzen ist, bleibt, was Schadstoffe betrifft, der Übergang vom Schweröl auf saubere, aber eben teure Brennstoffe – zunächst den Marinodiesel, wie er längst schon in den Häfen und anderen Bereichen an den Küsten Vorschrift ist. Relativ neu ist die Verwendung von Flüssigerdgas (LNG), das wenig Schadstoffe enthält, aber immer noch CO<sub>2</sub> erzeugt. Dennoch gilt LNG als Einstieg für andere höherwertige Brennstoffe, in Richtung einer »Dekarbonisierung« bis hin zum reinen Wasserstoff.

Besonders die in Verruf geratene Kreuzschifffahrt, die den Zuständen auf See eine größere Öffentlichkeit verschafft, wirbt mit den Schlagworten solcher erster Maßnahmen. Der Kunde will, dass »sein Schiff« zeitgemäß ist und das breite Smiley am Bug zu Recht führt, wenn z. B. erstmals LNG verwendet wird. Auch das Modewort »Hybrid« wird hurtig aufgerufen. Dabei ist die Kombination von Verbrennungs- und Elektromotor und Akkumulatoren z. B. bereits im Jahr 1906 bei dem Tauchboot U1 im Museum zu finden, und der Verbrennungsmotor bleibt der primäre Antrieb. Von den modernen Kreuzschifffahrtsgesellschaften lässt sich eine U-Boot-typisch leise Elektro-Schleichfahrt in ein umweltfreundliches Passieren antarktischer Gewässer verwandeln, um (für eine halbe Stunde) weiter »in unberührte Wildnis hineinzugleiten« – so der Werbeprospekt.

Die Problemstellung ähnelt sehr den gegenwärtigen Antriebsvarianten bei Automobilen, dabei ist der Elektro-



Frühe, schlichte Elektromobilität in Bayern: Ein Elektromotor mit 7,5 kW genügte im *Hoher Göll* (Baujahr 1911), um bis zu 100 Fahrgästen den Königssee zu erschließen. Die Fahrtstrecke von 1911 bis 1988 entsprach einer 12fachen Erdumrundung. Das Schiff befindet sich in einem Depot des Deutschen Museums.

antrieb auch auf dem Wasser schon alt und erstmals 1838 vorgeführt worden. Er war um 1900 verbreiteter als heute. Wenn heute Projekte wie Lkws mit Oberleitungen genannt werden, so gab es damals schon eine Binnenschifffahrt mit Oberleitungen, (*Kultur & Technik* 2/1993, S. 20) und auch Verkehrsboote fuhren elektrisch. Naheliegende Beispiel sind die Ausflugsboote des Königssees, die seit 1909 auch aus Umweltgründen über Nacht am Netz der zuführenden Bahnlinie aufgeladen werden.

Es scheint die heimatliche Nähe zu sein, die den Schutz der Umwelt fördert, zudem ermöglicht sie Ladestationen an Land. Im Sognefjord ging 2015 *Ampere*, die erste akkulektrische Fähre in Norwegen in Betrieb. Auch ein erstes, kleines Containerschiff soll in Küstennähe fahren und den Lkw-Verkehr ersetzen. Doch über weite Strecken, noch deutlicher als beim Auto, ist herkömmlicher Batteriebetrieb nicht denkbar. Es bedarf eines Speichermediums, wie es Wasserstoff sein könnte. Die Gewinnung von Wasserstoff unter Verwendung von erneuerbarer Energie durch Elektrolyse ist schon länger bekannt, sie wurde bereits um 1895 durchgeführt und wird heute als »Power-to-Gas« bezeichnet.

Es ist eine Ironie, dass gerade die Schiffe, die über ein großes Aggressionspotenzial verfügen, sehr bemüht um geringe Umwelteinflüsse sind, nämlich die Unterseeboote. Jede Emission, jedes Geräusch bedeutet eine Signatur, und »footprints«, die es einem Gegner zu verbergen gilt. Brennstoffzellen fuhren erstmals 1987 auf dem für sie umgebauten (vierten) U1, ein Meilenstein für die Antriebe von U-Booten. Module der zweiten Generation sind auf den U-Booten der Klasse 212A der Bundesmarine eingebaut. Ähnlich wie der Betrieb von Elementen, hat die Brennstoffzelle einen langen Weg hinter sich. 1838 entdeckt und beschrieben, wurde sie jedoch als Stromerzeuger durch die Dynamomaschine des Werner von Siemens verdrängt und fand erst einen Einstieg in der anspruchsvollen Raumfahrt. Ihr Abfallprodukt ist hier ideal: pures Wasser.

Für den Antrieb ziviler Schiffe ist die Leistung der Brennstoffzelle bisher zu gering und teuer. Ihre Verwendbarkeit zeigt sich am Projekt einer Fähre mit Brennstoffzellen für den Verkehr zwischen den schottischen Inseln ab 2021. Ihre Energie wird aus lokalen Wind- und Ge-



zeitenkraftwerken gewonnen und direkt in Wasserstoff umgewandelt. So ist es ein naheliegendes Verfahren, die Windkonverter, die schon aufgrund ihrer Fundamente optimaler ausgelegt werden können und auch daher bisher viel erfolgreicher waren als Windschiffe, heranzuziehen, um Wasserstoff und im weiteren Prozess Methan für Schiffsantriebe zu gewinnen und zu speichern.

Um allerdings die Auflagen einzuhalten und sich schließlich dem Zustand einer »zero emission« zu nähern, sind noch Verbesserungen in vielen Detailfragen nötig. Nirgends war eine solche Entwicklung schneller zu skizzieren als in der Literatur. Im Jahr 1867 hatte Jules Verne mit der *Great Eastern* den Atlantik überquert: »Waren und Kohle füllten die Lager, Gepäckabteile, die Laderäume«. Doch bereits 1875 schrieb der Visionär über die Dekarbonisierung und die Brennstoffzelle: »Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.« Das Ziel ist genannt, die möglichen Kurse müssen noch abgesteckt werden. ■



DER AUTOR

**Dr. Jobst Broelmann** leitete 23 Jahre lang die Schifffahrtabteilung des Deutschen Museums. Er ist Autor und Herausgeber zahlreicher Bücher zur Geschichte des Schiffbaus und der Seefahrt.



# Direkt gegen den Wind

*Die Geschichte begann mit einem Flop und erwies sich am Ende als glanzvolles Beispiel deutschen Erfindergeistes: Die Entwicklung von Segeltuchen aus Kunstfasermaterial. Von Jörn Bohlmann*

Das kleine, aber durchaus bemerkenswerte Kapitel deutscher Industrie- und Technikgeschichte begann in den frühen 1950er Jahren. Am Ende verlor ein amerikanischer Weltmarktführer seine Quasi-Monopolstellung an einen bis dahin eher unbedeutenden Segeltuchproduzenten aus Krefeld. Teamgeist, handwerkliches Geschick und unbedingte Beharrlichkeit verwandelten ein anfängliches Scheitern in einen großen Erfolg. Margret Plöntges, Theo Schreus und Herbert Cox stehen als exemplarische Vertreter für die Facharbeiterinnen und Facharbeiter, die mit Fleiß und ihrem Engagement für den Erfolg eintraten.

Segeltuch? Ein absolutes Nischenthema, mag denken, wer nicht selber segelt. Vergewöhnlich man sich jedoch, welche immense Bedeutung Segeltuch über viele Jahrtausende in der Geschichte der Menschheit eingenommen hat, rückt das Thema rasch aus der Nische heraus. Bereits in der Antike wurden auf Segelschiffen größere Mengen an Waren verfrachtet, als einfache Ochsenkarren fassen konnten. Segelschiffe sorgten für einen nahezu kontinuierlich prosperierenden Handel, quer über Binnen- und Weltmeere, über alle Grenzen hinweg. Wein und Gewürze, Kaffee und Tee, Gold, Silber und Geschmeide segelten mit – und nicht zuletzt die Menschen selbst. Und mit ihnen ihre Sprachen, ihre Kulturen und ihre Gebräuche. Als Antrieb der Schiffe dienten Segel und Wind.

Bis zu Beginn der 1950er Jahre wurden im europäischen Kulturkreis Segel über Jahrtausende hinweg meist entweder aus den Fasern des Hanfs, des Flachs oder der Baumwolle hergestellt. Im skandinavischen Raum diente u. a. auch Wollhaar zur Herstellung von Segeltuch. Die Gewinnung des zu Fäden verspinnbaren Rohmaterials war sehr arbeitsintensiv. Ob jedoch Wollhaar oder pflanzliche Fasern: Stets war eine Vielzahl von Arbeitsschritten notwendig, um schließlich ein spinnbares Rohmaterial zu gewinnen. Das Spinnen und Weben der Tuche waren ebenso arbeitsintensive Tätigkeiten. Alleine die rund 3500 Viermastbarken – viermastige Segelschiffe, die um das Jahr 1900 noch in der weltweiten Handelschifffahrt tätig waren – benötigten knapp 24 Millionen Quadratmeter Segeltuch.



Der Segelmacher,  
Kupferstich von Christoph  
Weigel (1654–1725).  
Aus: *Abbildung und  
Beschreibung der gemein-  
nützlichen Hauptstände,  
Regensburg 1698.*

## Industrialisierung

Die Entwicklung der ersten industriellen Spinnmaschine, der Spinning Jenny, durch den englischen Weber James Hargreaves (1721–1778) im Jahr 1767 war eine erste umwälzende Erneuerung in der Textilproduktion. Wurden Webgarne zuvor im sogenannten Verlagssystem, also in dezentraler häuslicher Produktion gesponnen, ersetzte bereits das erste Modell der Spinning Jenny acht Handspinnerinnen. Und die technologische Entwicklung des Spinnens war rasant. Die mittels Wasserkraft angetriebene Water Frame durch Richard Arkwright (1732–1792) oder eines weiteren Nachfolgermodells der Spinning Jenny namens Spinning Throstle ermöglichte, dass eine einzige Maschine mehr als einhundert Handspinnerinnen und Spinner ersetzte. Tausende von Menschen, die zuvor zumindest ein karges Einkommen hatten, nagten nach der Einführung der Spinnmaschinen am sprichwörtlichen Hungertuch. Was unter anderem zu massiven gesellschaftlichen Missständen und sozialen Unruhen führte. Der Schlesische Weberaufstand von 1844 stellt nur eines jener Kapitel in der Geschichte der Technik dar, die bei Weitem nicht immer nur Verbesserungen brachte, sondern zuweilen auch traurige Missstände gebar.

Es sollte noch bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts dauern, ehe erste Textilien aus Kunstfasermaterial gewoben werden konnten. Zwar gelang es dem französischen Graf Hilaire de Chardonnet (1839–1924) auf der Basis von Maulbeerblättern ein Zellulosenitrat und daraus eine erste Kunstseide herzustellen. Sie wurde auf der Pariser Weltausstellung im Jahr 1889 der Öffentlichkeit vorgestellt, wo sie auch prompt großes Aufsehen erregte. Diese Kunstseide hatte jedoch einen beträchtlichen Nachteil: Sie war extrem leicht brennbar. Nur der aller kleinste Funke einer Zigarette genügte, um das Material in Sekundenschnelle in hellen Flammen aufgehen zu lassen. Die Herrenwelt spottete, dass man sich seiner Schwiegermutter elegant dadurch entledigen könne, indem man ihr ein Kleid aus Kunstseide schenkte. Weshalb das Material im Volksmund auch »Schwiegermutterseide« genannt wurde. Der ersten Kunstseide folgten rasch weitere Textilentwicklungen, beispielsweise weniger brennbare Bemberg-Seide oder Viskose. Als Ausgangsmaterial diente noch immer Zellulose,



also ein pflanzliches Material. Das erste vollsynthetisch hergestellte Textilmaterial kam schließlich 1931 auf den Markt: Polyvinylchlorid, PVC. Es wurde von dem bei den IG-Farben beschäftigten Chemiker Emil Hubert (1887–1945) entwickelt.

### Nylon lässt Spinnaker fliegen

Das erste vollsynthetisch hergestellte Textilmaterial, welches auch als Segeltuch verwendet wurde, war das Nylon, Polyhexamethylenadipinsäureamid, 1935 von Wallace H. Carothers (1896–1937) entwickelt. Nylon verfügt über eine Reihe von Eigenschaften, die bis dato unerreicht waren. Es ist leichter als Seide, nimmt wenig Feuchtigkeit auf, hat eine hohe Festigkeit, ist knitter-, quellfest sowie resistent gegenüber Schädlingen. Fantastische Eigenschaften verglichen mit Hanf, Leinen oder Baumwolle. Nahezu zeitgleich, 1938, gelang auch den Beschäftigten der deutschen IG-Farben die Entwicklung eines sehr ähnlichen Materials aus Polyamidfasern: Perlon. Doch beide neuen Materialien erblickten am Vorabend des Zweiten Weltkrieges das Licht der Welt, so dass die neuen Materialien erst nach Ende des Krieges den zivilen Markt eroberten.

Im Jahr 1953 erregte eine in Seglerkreisen weithin bekannte Rennyacht, die Rubin, mit einem Spinnaker aus »Perlonseide« großes Aufsehen: »ein Segel, das bei dem leichten Wind nicht nur Schatten warf – und schon beim geringsten Hauch stand«, berichtete das Magazin *Die Yacht*. Die geringe UV- und Formbeständigkeit ließen Nylon vor allem als Spinnakertuch tauglich erscheinen. Für die übrigen Segel erwies sich ein anderes Material als wesentlich besser geeignet. Ein Material, welches nicht nur die Welt der Segler revolutionieren sollte: das Polyester.

### Polyester, ein Traumstoff für Segler

Die Erfindung der Polyesterfaser gelang 1941 den beiden Engländern Jon Rex Whinfield (1901–1966) und James Tennant Dickson. Mitten im Zweiten Weltkrieg. Beide waren beim britischen Textilunternehmen Calico Printers Association beschäftigt. Der von der britischen Regierung eingesetzte Kontrolleur der chemischen Industrie erkannte die Bedeutung der Entdeckung rasch, so dass Polyester zur Geheimsache

1956 war der Begriff »Dacron« bereits derart zu einem Synonym für Polyester-Segeltuch geworden, dass die Vereinigte Seidenwebereien das von ihr hergestellte Polyestersegeltuch kurzerhand unter dieser Bezeichnung bewarb. (*Die Yacht*, 1956)

erklärt wurde. Von den Bombardements des Weltkrieges gebeutelt, veräußerten die Engländer jedoch 1946 die Herstellungsrechte u. a. an den amerikanischen Chemiekonzern Du Pont, der 1953 damit begann, Polyestergerne unter dem Handelsnamen »Dacron« herzustellen.

Es mutet wie die Geschichte eines amerikanischen Gründertraumes an, dass just zu dieser Zeit ein aus Russland stammender Lizenznehmer namens Sol Lamport sich entschied, nicht nur Regenmäntel und Schutzanzüge, sondern auch Segeltuch aus eben jenen Polyestergerne zu weben. Lamport eröffnete damit ein Marktsegment, auf welches die Seglerwelt lang gewartet hatte. Denn die nach dem Webgarn benannten Dacron-Segel wiesen gegenüber den bis dato verwendeten Naturfasertüchern geradezu traumhafte Eigenschaften auf. Im Gegensatz zu diesen reckten sie bei Nässe kaum aus, schrumpften bei Trocknung nicht unkontrolliert wieder zusammen, ließen sich zudem vergleichsweise wenig aus der Form ziehen und verspaken kaum, wenn man sie nass zusammenlegte. Es war vor allem aber die fantastisch anmutende Formstabilität, von der die Seglerwelt bis dahin noch nicht einmal zu träumen gewagt hatte. Das neue Dacron-Tuch wirbelte den Markt auf wie ein Hurrikan. Jährlich etwa eine Million Meter Segeltuch produzierte und verkaufte Sol Lamport. Zu Beginn der 1960er Jahre deckte seine Produktion etwa 90 Prozent des weltweiten Segeltuchbedarfs. Dacron-Tuch war unangefochtener Weltmarktführer. Und in der Seglerwelt in aller Munde. Die Polyester-Euphorie beeindruckte auch einen damals über fünfzigjährigen Herrn: Theo Schreus aus Krefeld.

### Die Vereinigten Seidenwebereien Krefeld

Zu Beginn der 1950er Jahre hielt sich der 1898 geborene Theo Schreus als Kurgast in Stock bei Prien am Chiemsee auf, wo er sich langweilte. Bei einem Spaziergang kam er mit einer Gruppe junger Seglerinnen und Segler ins Gespräch. Diese schwärmten ihm von den neuen, so fantastischen amerikanischen Segeltüchern namens Dacron vor. Obwohl Schreus gar kein Segler war, wurde er hellhörig. Nicht nur, weil ihn das Segeln ohnehin schon lange interessierte. Sondern auch, weil er als Direktor der Abteilung

Herbert Cox verleiht einen Pokal an die Siegerinnen der Deutschen Meisterschaft in der 420er-Klasse.



Technische Gewebe bei den Vereinigten Seidenwebereien Krefeld bereits mit der Herstellung von Polyestertextilien zu tun hatte. Im Verlauf seines Kuraufenthalts am Chiemsee lernte Schreus nun nicht nur das Segeln, sondern fuhr auch mit dem Plan nach Hause, in das vielversprechende Geschäft der Segeltuchproduktion aus Polyestergeräten einzusteigen.

Zurück in Krefeld begannen bald die ersten Webversuche mit Polyesterfäden, die von den Vereinigten Glanzstoff-Fabriken in Wuppertal geliefert wurden. Da die Krefelder Tuchweber mit der Produktion hochfester und äußerst präzise gewebter Textilien, wie beispielsweise Müllergazen, bestens vertraut waren, gelang die Entwicklung eines ersten marktreifen Kunstfasergelutuchs für den damaligen Stand der Technik relativ zügig. Getauft wurde dieses Tuch auf den Namen Diolen – und erhielt damit, wie Dacron, einfach den Handelsnamen seines Webfadens.

Im Jahr 1957 erhielt endlich das aus Diolen-Fasern gefertigte Segeltuch einen eigenen Handelsnamen: Blue Dytex. Genau wie Dacron-Tuch, wurde Blue Dytex in der Leinwandbindung gewoben. In dieser einfachsten der drei Bindungsformen des Webens überkreuzen sich jeweils alle Kett- und Schussfäden direkt miteinander, so dass die Fäden im Gewebe die größtmögliche Anzahl von Überkreuzungen, sogenannten Bindungspunkten, erhalten. So werden Tuche nicht nur bestmöglich querstabil, sondern erlauben auch eine gleichmäßige Aufnahme von Füllstoffen, den Appreturen. Und genau diese Appreturen aus Kunstharz waren es, mit denen alle Segeltuchhersteller im Laufe der 1950er Jahre zu kämpfen hatten.

Das Einbringen von Kunstharzen als Füllstoff in das Gewebe war (und ist zum Teil noch) nur einer von vielen Arbeitsschritten in der Tuchveredelung. Diese wird in der Fachsprache der Weber als Ausrüsten bezeichnet. Es umfasst eine Reihe komplizierter Behandlungen, die in aller Regel mit einer Trockenbehandlung wie Bürsten, Klopfen, Rauhen oder Scheren beginnen. Danach wird ein beim Weben oft notwendiges Gleitmittel, die Avinage entfernt, um das Tuch kontrolliert zu schrumpfen (thermofixieren), zu walzen und zu krumpfen. Krumpfen heißt, das Gewebe unter thermischem Einfluss zu stauchen. Anschließend wird es in sogenannten Spannstraßen wieder gestreckt.



Herbert Cox und Margret Plöntges, führten ab 1969 das Unternehmen zum heutigen Erfolg.

Und so weiter. Das Ausrüsten der Tuche kann Tage dauern und in unterschiedlicher Reihenfolge, Dauer und Intensität wiederholt werden.

All diese heute selbstverständlichen Arbeitsschritte für die Fertigung von Polyestersegeltuchen mussten im Laufe der 1950er Jahre jedoch erst entwickelt werden: Eine Arbeit, die anfangs mit vielen Enttäuschungen einherging, wie Theo Schreus in einem Interview in *Die Yacht* 1969 kundtat. Gerade die Dauerhaftigkeit der Füllstoffe war eine Herausforderung in der Produktion. Nicht nur für Blue Dytex, sondern auch für die Polyesterstuche aller anderen Hersteller. Aus diesem Grund hatten bekannte Segelmacher in Amerika und England begonnen, eigene Tuche zu weben, die erfolgreich ohne Appreturen auskamen. Weshalb zu Beginn der 1960er Jahre schließlich der Marktanteil des Blue Dytex zusehends schwand.

### Vom Misserfolg zum Weltmarktführer

Die Krefelder Weber ließen sich jedoch nicht entmutigen. Im Jahre 1966 präsentierten sie ein neues Polyester-Segeltuch auf dem deutschen Markt: Polyant. Eine der wichtigen technischen Neuerungen war, dass das neue Polyant-Tuch mit markant weniger Kunstharz-Appreturen auskam. Im Laufe der kommenden Jahre konnte darauf sogar gänzlich verzichtet werden.

1969 ging Theo Schreus in den Ruhestand und übergab die Leitung des Unternehmens an Herbert Cox und Margret Plöntges. Beide hatten eine textiltechnische und kaufmännische Ausbildung bei den Vereinigten Seidenwebereien Krefeld durchlaufen und damit ihr Handwerk von der sprichwörtlichen Pike auf gelernt. Theo Schreus vermittelte Margret Plöntges anlässlich ihres Eintritts in die Leitung der Sparte Technische Gewebe zudem noch einen Segelkurs in eben jener Segelschule am Chiemsee, in der er selbst die Initialzündung für die Entwicklung der neuen Segeltuche erhalten hatte. Und da seine zwei Mitarbeiter mit großer Freude technische Probleme lösten, »die andere noch nicht mal zu probieren Lust verspürten«, wie 1969



Moderne Produktionshalle von Dimension-Polyant in Kempen.

*Die Yacht* schrieb, stand die Weiterentwicklung der neuen Segeltuche Polyant unter einem guten Stern.

In einem Interview in *Die Yacht* im Jahr 1967 beschreiben Theo Schreus und Herbert Cox, wie knifflig sich die Entwicklung des neuen Tuchs gestaltete. Nicht nur, dass für die Produktion von Segeltuch vollkommen neue Webstühle entwickelt und gebaut werden mussten. Auch die anfänglich verwendeten Polyestergerne der Vereinigten Glanzstoff AG aus Wuppertal erwiesen sich als zu wenig UV-Licht-beständig. »Also gingen wir unseren Spinnern auf die Nerven«, merken die beiden im Interview an. »Wir wären wohl nicht so schnell weitergekommen, wenn die segelbegeisterten Herren von der Glanzstoff nicht so willig auf unsere Wünsche eingegangen wären und auch kleinste Versuchspartien gesponnen hätten.«

Da die Garne als Ausgangsmaterial für das Segeltuch von großer Bedeutung waren, etablierten Margret Plöntges und Herbert Cox wöchentliche Treffen mit den Technikern des Wuppertaler Spinnereibetriebs Vereinigte Glanzstoff AG. In diesen Treffen wurden die Ergebnisse der wöchentlichen Versuchsproduktionen vorgelegt, diskutiert und die Garnproduktion entsprechend der Erfahrungen und Wünsche der Weberei justiert. So hoch waren die Ansprüche an die Qualität der Polyestergerne, dass zeitweise nur zehn Prozent der Ware zur Segeltuchproduktion taugten – und die Vereinigte Glanzstoff AG ihre Webgarne kontinuierlich verfeinerte. Präzise Arbeit erwarteten Plöntges und Cox auch von ihren eigenen Angestellten. Cox verbrachte mit erfahrenen Webern viele Nächte bei den Webstühlen, um mittels kleinster Einstellungen und Justierungen aus einer Probeproduktion das Beste herauszuholen. Manches Mal, so erinnert er sich, musste er die professionellen Weber davon überzeugen, dass auch scheinbar gute Tuche

eines Probelaufes noch weiter zu verfeinern waren. »Winzige Unterschiede und feinstes Justieren konnten dramatische Auswirkungen auf die Qualität haben.«

»Das war nicht nur meine Spleenigkeit – und wenn ein Millimeter für eine Justierung zu grob war, mussten wir in Zehntel und Hundertstel Millimeter denken.« Zudem lobten die Verantwortlichen Leiter der Sparte Technische Gewebe die Handwerkerinnen und Handwerker des Webereibetriebes ausdrücklich: »Jeder Meister hier und jeder Stuhlkontrolleur hat Leidenswege. Das gebiert auch Ideen, Auswege, Erlösung. Zuweilen halfen Tricks, die keine sind, denn wir griffen nur auf ein paar Dinge zurück, die Weber vor Generationen machen mussten.«

Bei Messen und persönlichen Besuchen in Segelmachereien lernten Margret Plöntges und Herbert Cox die meisten Segelmacher in der Bundesrepublik persönlich kennen. Dadurch wurden direkte Rückmeldungen über die Qualität und Verarbeitung der Segeltuche ermöglicht. Die Seglerinnen und Segler in den deutschen Leistungskadern wiederum testeten die Neuentwicklungen auf internationalen Regatten und konnten anhand ihrer praktischen Erfahrungen Verbesserungen und Neuerungen vorschlagen. Und »nebenbei« brachten sie dabei so manchen Regattasieg und Pokal nach Hause.

Dem Leitungsduo Plöntges, Cox sowie »ihren« flinken Handwerkerinnen und Handwerkern gelang im Laufe der 1970er Jahre eine Vielzahl weiterer technischer Entwicklungen und Verbesserungen bei der Produktion von Polyestersegeltuch. So wurden die Schussfäden nun nicht mehr mittels Schiffchen, Greifer oder Projektilen in die Gewebe gebracht, sondern mittels eines feinen Wasserstrahls quer über die Kettfäden geschossen. Zudem kamen zu Beginn der 1980er Jahre erfolgreich die ersten Foliensegel auf dem Markt. Deren Entstehen ging eng mit der Entwicklung des Windsurfens einher.

Anfangs waren Foliensegel, mit denen schon ab 1957 experimentiert wurde, zwar schon sehr formstabil, aber noch nicht besonders reißfest. »Schon der Einstich einer Nadel kann tödlich sein«, hieß es. Eine »Kinderkrankheit«, die wiederum die Segeltuchhersteller, die seit 1970 nicht mehr in Krefeld, sondern im Kempen nahe der niederländischen Grenze produzierten, endgültig kurieren konnten.

Eine weitere Neuerung stellte eine Produktionsmethode dar, bei welcher die Garne der Kett- und Schussfäden nicht mehr »klassisch« im 90°-Winkel miteinander verwoben, sondern stattdessen einzelne Gewebeerstärkungsstränge in Winkeln von 6°, 13° und 22° in Foliensegel gebracht werden können. Mit der Entwicklung dieses als X-Ply bezeichneten Verfahrens war neben dem Team um Plöntges und Cox auch die amerikanische Firma »Dimension« beschäftigt.

#### **Erfolgreiche Zusammenschlüsse**

Um den Sprung in die nächste Entwicklungsstufe der Segeltuchtechnologie schneller stemmen zu können, fusionierten 1991 die beiden Betriebe Polyant und Dimension zu Dimension-Polyant. Während die Zahl der Angestellten beim deutschen Hersteller Polyant, vormals Technische Gewebe der Vereinigten Seidenwebereien, zu dieser Zeit etwa achtzig Personen ausmachte, kamen mit der amerikanischen Firma Dimension, die ihre Produktion in den Vereinigten Staaten weiterführte, etwa dreißig neue Mitarbeiter in den Betrieb hinein.

Der internationale Marktanteil von Dimension-Polyant stieg auf 37 Prozent und die Firma avancierte damit zum größten Segeltuchproduzenten weltweit. In den 1990er Jahren kamen zwei französische Niederlassungen in Marseille und La Rochelle, eine englische Niederlassung in Southampton sowie eine weitere Niederlassung im australischen Sydney hinzu. Zudem investierte die Firma in eine neue Technologie namens »D4«, die von Fraiser Sails im australischen Somersby entwickelt wurde: Die Segel werden nun nicht mehr aus einzelnen Segeltuchbahnen zusammenklebt oder genäht, sondern stattdessen in einem einzigen Stück auf Maß gefertigt.

Segeltuche sind heute hochkomplexe Gewebe, Folien oder Lamine, die nicht mehr nur »klassisch« gewoben werden. Sie werden nicht nur als Segeltuch, sondern längst auch als Armierungsmaterial im Hochbau, in der Elektrotechnik oder der Luft- und Raumfahrt verwendet. Die kleine Firma, die in den 1950er Jahren mit einer wenig erfolgreichen Produktion namens Diolen bzw. Blue Dytex begann, entwickelte sich ab 1991 zu einem der führenden Hersteller und ist heute Weltmarktführer. ■



DER AUTOR

#### **Dr. Jörn Bohlmann**

ist Ethnologe, gelernter Segelmacher und Holzbootsbauer. Er arbeitete viele Jahre im Handwerk, fuhr mehrere Jahre zu See und lebte 18 Jahre im skandinavischen Ausland. Von 2016 bis 2018 war er Kurator für Schifffahrt im Deutschen Museum. Er ist derzeit an der Wossidlo-Forschungsstelle für europäische Ethnologie/Volkskunde an der Universität Rostock tätig.

# RADSPIELER

*Seit 1841*



*Radspieler –  
damit  
Einrichten  
Freude  
macht!*



*F. Radspieler & Comp. Nachf.  
Hackenstraße 7  
80331 München  
Telefon 089/23 50 98-0  
Fax 089/2642 17  
www.radspieler.com*



# Ende eines Höhenflugs

*Senkrecht startende Fluggeräte brauchen weniger Platz für Starts und Landungen. In Kriegsgebieten, wo Flughäfen im Fokus von Angriffen stehen, ist das keine uninteressante Option. Aber auch die zivile Luftfahrt setzte große Hoffnungen in die Senkrechtstarter. Von Phillip Berg*

**B**ereits früh gab es Überlegungen, Fluggeräte ohne oder nur mit minimalen Start- und Landebahnen auskommen zu lassen. Die Tragschrauber des spanischen Erfinders Juan de la Cierva, die ersten Hubschrauber sowie zahlreiche Reißbrettentwürfe während des »Dritten Reiches« zeugen von diesen Bestrebungen. Dabei entstand eine Reihe von Prototypen, die wohl zu den luftfahrttechnischen Kuriositäten gezählt werden können. Nach 1945 betrieben vor allem Ingenieure in den USA die Forschung an STOL- und VTOL-Projekten. STOL steht für »short take-off and landing«, VTOL bedeutet »vertical take-off and landing«.

Die US-Navy griff mit der Lockheed XFY-1 und der Convair XFY-1 das Konzept des Heckstarters, wie es von der deutschen Bachem Ba 349 »Natter« bekannt war, wieder auf. Es konnte sich dennoch nicht durchsetzen. Weitere Ideen waren schwenkbare Motoren, Schubvektorsteuerung oder Startraketen. Dabei kamen auch exotische Designs zur Anwendung, zum Beispiel der Ringflügel der SNECMA C.450 Coléoptère.

Lässt man Helikopter außen vor, ist die Geschichte der senkrecht startenden und landenden Fluggeräte eine Geschichte des Scheiterns. Die wenigsten Konzepte wurden in Serie gefertigt. Zum Einsatz gelangten lediglich vier Entwürfe. Dabei handelt es sich um die britische Hawker Siddeley Harrier, die sowjetische Yakowlew Yak-38 sowie eine Variante des aktuellen internationalen Großprojekts Lockheed F-35. Die Bell-Boeing V-22 beschritt als erstes in Serie gefertigtes Kipprotorflugzeug neue Wege.

Hinter vielen technischen Innovationen stand und steht das Militär. So ist es auch bei Senkrechtstartern. Eine Grundannahme war bis zum Ende der 1960er Jahre, dass Start- und Landebahnen zu den ersten Opfern eines Krieges würden. Mit behelfsmäßigen Pisten, sogenannten Notlandeplätzen (NLP), die auf geeigneten Autobahnabschnitten gleich bei deren Bau angelegt wurden, hofften die Verantwortlichen, den Ausfall der eigentlichen Flugplätze kompensieren zu können. Bereits auf den Reichsautobahnen Nazideutschlands gab es solche Abschnitte. Doch na-





Drei Senkrechtstarter in der Flugwerft Schleißheim des Deutschen Museums: links die Dornier Do 31 E3, unter deren Tragfläche in der Mitte eine VAK 191B und rechts auf einer Schwebesäule die VJ 101 C-X2.



türlich waren auch diese NLPs weder vor der Aufklärung noch vor der Zerstörung durch den Feind gesichert. Die geraden, etwa zwei Kilometer langen Strecken ohne überquerende Hindernisse, mit durchgehend asphaltiertem Mittelstreifen und auffällig versetzten Rastplätzen waren leicht zu entdecken. Die Antwort erschien einfach: Flugzeuge, die keine Start- und Landebahn brauchen.

Dies sollte Unabhängigkeit von der gewohnten Infrastruktur gewährleisten und insgesamt größere Flexibilität der fliegenden Streitkräfte herbeiführen. Zugleich wollten die Militärs keine Leistungsabstriche im Vergleich zu bereits genutzten Flugzeugmustern machen. Um die Parameter zu definieren, gab die NATO ab 1960 entsprechende Anforderungspapiere heraus. Die NATO Basic Military Requirement (NBMR) 3a, 3b, 4 sowie 22 enthielten dabei die Beschreibungen der gewünschten Leistungsdaten eines Jagdflugzeugs, eines Jagdbombers und eines Transportflugzeugs, die vertikal abheben und landen können sollten. Die Neuentwicklungen mussten im Grunde als zusätzliche Kapazität senkrechten Start und Landung ermöglichen und zugleich die Leistungen vorhandener konventioneller Flugzeuge erreichen. Die deutsche Luftfahrtindustrie schlug für jede Anforderung ein Flugzeug vor.

Der Zusammenschluss Entwicklungsring Süd GmbH, bestehend aus den deutschen Herstellern Messerschmitt, Heinkel und Bölkow, arbeitete seit 1959 mit Hochdruck an der Entwicklung des Senkrechtstarters VJ 101 C, der die gleichen Flugleistungen erbringen sollte wie das gerade erst für die Luftwaffe ausgewählte Kampfflugzeug F-104

»Starfighter«. Bemühungen, den »Starfighter« mit Hilfe von Raketen zumindest zum beinahe senkrechten Start zu befähigen, wurden nach einigen Testreihen im sogenannten ZELL-Programm (zero length launch) abgebrochen. Bei der VJ 101 C handelte es sich aber keineswegs um ein bereits einsatzreifes Flugzeug. Vielmehr waren die beiden gebauten Maschinen Erprobungsträger, mit denen die komplexen Anforderungen an das Steuersystem der Triebwerke auf die Eignung für die Bedienung durch einen Piloten getestet werden konnten. Aus ihnen wäre dann im Anschluss das »richtige« Kampfflugzeug entstanden.

Das Konzept der VJ 101 C für den Senkrechtstart war einfach. An den Flügelspitzen befanden sich schwenkbare Gondeln, in denen je zwei Triebwerke Platz fanden. Sie dienten sowohl den Start- und Landephasen wie auch dem Reiseflug. Im Rumpf selbst arbeiteten zwei weitere Triebwerke, die nur als Hubtriebwerke fungierten und im Geradeausflug abgeschaltet wurden. Bei den ersten Testflügen wollten die Ingenieure kein Risiko eingehen. Um die Piloten, aber auch das Flugzeug zu schützen, konstruierten sie eine spezielle Halterung, die das Umkippen des Fliegers verhinderte. Eine solche Fesselung fand bei allen Senkrechtstarterprojekten Anwendung. Grundsätzlich schränkte diese die Bewegungsfreiheit des Testflugs nicht ein.

Bald verzichtete das Testteam auf den Käfig und unternahm freie Flüge, die erfolgreich verliefen. Mit dem ersten Prototyp wurde die Schallmauer am 29. Juni 1964 durchbrochen. Diesen Meilenstein hatte bis dahin kein senkrecht startendes Flugzeug erreicht. Das Programm erlitt jedoch

Die VJ 101 C-X2 während der Flugerprobung. Aus diesem Technologiedemonstrator sollte ein senkrecht startender Nachfolger für die noch jungen F-104 Starfighter entwickelt werden.

#### Zum Weiterlesen

Peter Kielhorn, *Dornier Do 31*, Stuttgart 2018.

Helmut Madelung, Rolf Riccus, Dieter Schmitt u. a., *Die deutschen Senkrechtstart-Flugzeuge EWR VJ 101C, Dornier Do 31 und VFW VAK 191B. Historische Nachlese und Bewertung*, Bonn 2000.

Michael Taylor, *Die ungewöhnlichsten Flugzeuge der Welt*, Erlangen 2000.



Von links nach rechts:  
Konzeptzeichnung der BO 140 samt Anwendungsbeispiel: Das Flugobjekt kann auf engstem Raum landen, zum Beispiel auf Dächern von Hochhäusern.

Konzeptzeichnung der Dornier Do 231 »V-Jet«, bereits im Farbenkleid der Lufthansa. Unter Klappen der Flügelgondeln, in der Nase und seitlich vom Höhenleitwerk befinden sich die zahlreichen Hubtriebwerke.

Die VAK 191B während der Flugerprobung. Die Leistungen des Flugzeugs waren gut, aber die Strategie der NATO hatte sich inzwischen geändert und die Senkrechtstarter weitgehend obsolet gemacht.



einen herben Rückschlag, als der Prototyp im September aus geringer Höhe abstürzte und ausbrannte. Er war für die weitere Verwendung verloren. Bald darauf hob jedoch der zweite Prototyp ab und wurde bis 1971 erprobt. Dieser konnte bei 325 Versuchsflügen erfolgreich eingesetzt werden. Die US-Navy, die immer wieder VTOL-Projekte der Verbündeten begutachtete, zeigte kein gesteigertes Interesse. Auch verschiedene Vorschläge für Weiterentwicklungen blieben ohne Erfolg. Das Programm wurde beendet. Dem Testflugzeug blieb die Verschrottung erspart: Seit Ende des Erprobungsprogramms 1971 ist es im Besitz des Deutschen Museums.

Beinahe gleichzeitig startete die Suche nach einem senkrecht startenden Transportflugzeug für die Bundesluftwaffe. Den Entwicklungsauftrag des Verteidigungsministeriums erhielt die Firma Dornier im Jahr 1962. Das entworfene Fluggerät war etwa halb so groß wie eine Transall C-160D, die bald zum taktischen Transporter der Bundeswehr wurde. Das Konzept sah insgesamt zehn Triebwerke vor, von denen acht ausschließlich als Hubtriebwerke fungierten. Diese befanden sich in Gondeln an den Flügelspitzen. Die beiden Marschtriebwerke verfügten über je vier schwenkbare Düsen. Wie bei allen Senkrechtstarterprojekten wurde die Flugsteuerung mit Hilfe von Schwebegestellen erprobt. Dabei handelte es sich um recht einfache Konstruktionen, die nur die nötigste Ausstattung enthielten, jedoch mit einer identischen Steuerung und Grundauslegung der Triebwerke ausgestattet waren.

Das Entwicklungsprogramm musste bald aufgrund von Budgetkürzungen eingeschränkt werden: Dornier vergab die Zusatzbezeichnung »E«, was für »Experimentell« stand und reduzierte die Stückzahl der fliegenden Prototypen auf nur noch zwei Exemplare. Von diesen war lediglich die Do 31E3 in der Lage, senkrechte Starts und Landungen durchzuführen. Die E1 hatte statt der Hubtriebwerke Ballast an Bord. Sie diente für Testflüge, bei denen auch der konventionelle Start- und Landevorgang ausreichend war. Beide Prototypen flogen 1967 erstmalig. Die Flugerprobung bewies zwar die generelle Funktionstüchtigkeit des Konzepts, förderte aber zugleich Probleme zutage. Die Rezirkulation, also die Ansaugung der eigenen heißen Abgase durch die Triebwerke, führte zu Schwierigkeiten. Zudem

neigten die Triebwerke dazu, aufgewirbelte Gegenstände vom Boden anzusaugen. Die zahlreichen Hubtriebwerke erhöhten den Treibstoffverbrauch signifikant. Startete und landete die Do 31 vertikal, verbrauchte sie alleine dafür acht Prozent des mitgeführten Kerosins. Als noch komplizierter erwies sich schließlich die sehr hohe Arbeitsbelastung der Piloten. Start- und Landung waren somit besonders anfällig für fatale Fehler. Auch für diese Entwicklung westdeutscher Flugzeugkonstrukteure interessierte sich eine US-amerikanische Organisation, allerdings nicht die US-Navy. Vor der Beendigung des Programms 1970 wurden einige Testflüge von der NASA durchgeführt, jedoch ohne, dass sich daraus eine dauerhafte Zusammenarbeit ergab. Obwohl sich auch Neil Armstrong, erster Mensch auf dem Mond, positiv über die Eigenschaften der Do 31 äußerte, gab es keine weitere Entwicklung an diesem Flugzeug.

Parallel zum senkrecht startenden Ersatz für die F-104 wurde ein Nachfolger für den Jagdbomber Fiat G.91, bei der Luftwaffe liebevoll »Gina« genannt, gesucht. Die G.91 war eben erst an die Truppe übergeben worden. Ihr Nachfolger sollte natürlich ohne Start- und Landebahn auskommen. Im Gegensatz zur VJ 101 C musste dieser allerdings nicht die Schallmauer durchbrechen können. Das Projekt erhielt den Namen VAK 191, kurz für »Vertikalstartendes Aufklärungs- und Kampfflugzeug«, wobei die Zahl auf die geplante Nachfolge der G.91 hinwies. Verschiedene Konstruktionsbüros legten Studien vor. Die Wahl fiel auf den Entwurf von Focke-Wulf. Als Referenz in der Leistungserprobung sollte die parallel entwickelte Hawker P.1127 dienen, auf der später die erfolgreiche Harrier basierte. 1963 fusionierte Focke-Wulf mit Weserflug zu VFW, Vereinigte Flugtechnische Werke. Zwei Jahre später erhielt VFW den Auftrag für den Bau von sechs Prototypen, wobei eine Kooperation mit Fiat angestrebt wurde.

Bereits in dieser Phase des Vorhabens strich die Bundesregierung Gelder für das Programm, so dass nur noch drei Flugzeuge und eine Bruchzelle gebaut wurden. Der vertikale Start wurde bei der VAK 191B mit zwei fest installierten Hubtriebwerken und einem Marschtriebwerk, dessen vier Düsen Schwenkbar an den Rumpfsseiten montiert waren, erreicht. Für die Flugsteuerung setzte VFW auf die noch sehr junge elektronische Fly-by-Wire-Technologie.



1969 zog sich Italien und 1972 auch die Bundesrepublik aus dem Projekt zurück. Dennoch begutachtete die US-Navy das Vorhaben. Das bis 1975 durchgeführte Testprogramm bestand aus 91 Flügen und erhielt zu 80 Prozent eine Finanzierung aus den USA. Obwohl diverse Weiterentwicklungen vorgeschlagen wurden und das Flugzeug nach Einschätzung des Herstellers der inzwischen serienreifen Konkurrenz, der britischen Harrier, mehrfach überlegen war, konnte VFW keine weiteren Gelder für eine Fortsetzung des Programms einwerben.

Trotz der mehrheitlich aus militärischen Gründen betriebenen Grundlagenforschung gab es zivile Vorhaben, die senkrecht startende Passagierflugzeuge zum Entwicklungsziel hatten. Damit erhofften sich Hersteller und Fluglinien, diverse Probleme zu lösen. Immer dichter werdender Flugverkehr erforderte stetig wachsende Flughäfen. Doch oft war ein weiterer Ausbau nicht möglich, oder nur weit von Stadtzentren realisierbar. Um dem entgegenzuwirken, schrieb das Bundeswirtschaftsministerium einen Senkrechtstarter für etwa 100 Passagiere aus. Die Luftfahrtindustrie beantwortete die Anfrage mit zahlreichen Konzepten, bei denen nur zum Teil auf die militärischen Entwicklungen zurückgegriffen wurde.

Bei der viermotorigen Bölkow BO 140 handelte es sich um den Entwurf eines Kippflügelflugzeugs für 80 Passagiere. Das Konstruktionsprinzip orientierte sich dabei am Prototypen LTV XC-142, der in den frühen 1960ern in den USA erprobt wurde. VFW aus Bremen legte das Projekt VC 400/500 vor. Das in seiner Auslegung der amerikanischen Bell X-22 ähnliche Flugzeug war ebenfalls als Kippflügelflugzeug entwickelt worden. Im Gegensatz zur BO 140 waren die Triebwerke aber jeweils an einem eigenen Flügel montiert, was zu einem eher ungewöhnlichen Aussehen führte. Konventioneller wirkte das ebenfalls von VFW vorgelegte Konzept der strahlgetriebenen VC 180P. Neben drei Triebwerken für den Geradeausflug sollte sie zehn Hubtriebwerke erhalten. Die Hamburger Flugzeugbau GmbH schlug die HFB 600 »Vertibus« vor, die mit je vier Marsch- und Hubtriebwerken 91 Passagiere befördern können sollte. Auch Dornier durfte in der Reihe prominenter Entwürfe nicht fehlen. Mit der Do 231 »V-Jet« sollten die Ergebnisse des Do-31-Programms angewendet werden. Es waren 14 (!)

Triebwerke vorgesehen, zwölf davon hätten Hubtriebwerke sein sollen. Sie wurde als Gewinnerkonzept gewählt, obwohl sie 40 Prozent weniger Nutzlast gehabt hätte, als ein vergleichbares konventionelles Flugzeug.

Nachdem die Hoffnungen für einen militärischen Senkrechtstarter aus deutscher Fertigung bereits zu Grabe getragen worden waren, folgte 1973 auch der zivile Teil der Idee. Noch 1969 äußerte Professor Wilhelm Seibold, ein führender Aerodynamiker, die Hoffnung, Senkrechtstarter könnten bald im Liniendienst eingeführt werden. Doch die Ölkrise hatte Europa bald fest im Griff.

Senkrechtstarter waren schlicht und ergreifend nicht effizient genug. Sie verbrauchten zu viel Treibstoff bei Start und Landung, waren schwerer und hatten eine geringere Nutzlast als konventionelle Flugzeuge. Dadurch ließ auch die Reichweite zu wünschen übrig. Die Hubtriebwerke erzeugten einen infernalischen Lärm und überdurchschnittlich viele Abgase. Ideen, wie zum Beispiel ein V/STOL-Landeplatz auf dem Dach des Münchner Bahnhofs, konnten nicht umgesetzt werden. Die Idee erlebt seit 2018 eine Renaissance, seit Flugtaxis die Runde in den Medien machten. Ob es jemals dazu kommt, darf bezweifelt werden, denn trotz elektrischem Antrieb sind solche Fluggeräte sehr laut. Hinzu kommen ungeklärte Fragen der Luftraumregulierungen und Zulassungsfragen. Ein Massenverkehrsmittel dieser Art wird auf sich warten lassen.

Auch wenn es keines der deutschen Senkrechtstarterprojekte in die Serienfertigung schaffte, konnte sich eine ganze Generation junger Ingenieure an diesem anspruchsvollen Komplex abarbeiten. Sie sammelten wertvolle Erfahrungen, die bewiesen, dass die (west-)deutsche Luftfahrtindustrie ein gleichwertiger Partner in der europäischen Zusammenarbeit sein kann. Anschließend Projekte wurden mit Erfolg umgesetzt. Dazu zählen der Panavia Tornado, der Alpha Jet und natürlich das gesamte Airbus-Unternehmen, das sich zu einem der beiden Weltmarktführer der Luftfahrtbranche entwickelt hat.

Prototypen aller drei deutschen Senkrechtstarterprogramme sind heute im Deutschen Museum zu Hause. Die VJ 101 C-X2, eine VAK 101B und die Do 31 E3 werden in der Flugwerft Schleißheim der Öffentlichkeit präsentiert. ■■

Von links nach rechts:  
Die Do 31 E3 während der  
Flugerprobung. Das  
Flugzeug erfüllte alle  
Anforderungen, war aber  
schwer zu kontrollieren und  
stellte hohe Ansprüche an die  
Piloten.

Konzeptzeichnung der  
HFB 600 »Vertibus«. Das  
Flugzeug sieht mit seinen je  
vier Hub- und Marschtrieb-  
werken recht konventionell  
aus, kam aber nie über das  
Reißbrett hinaus.

Vom Bahnhof in die Luft: Die  
Idee, Flughäfen direkt an zen-  
trale Bahnhöfe anzubinden,  
ist keineswegs neu. Direkt  
vom Dach sollten Reisende  
abheben können. Züge  
fuhren auf mehreren Ebenen  
ein und auch an Autos wurde  
gedacht. Der perfekte  
Verkehrsknotenpunkt in  
besten Lage, natürlich ganz  
ohne Stau.



DER AUTOR

#### Phillip Berg M.A.

Der Historiker und Literaturwissenschaftler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich »Moderne Luftfahrt ab 1945« und dort insbesondere an der Neugestaltung der Dauerausstellung Moderne Luftfahrt beteiligt.



# Bildung – ein zentrales Anliegen

*Der Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum fördert besonders viele Projekte aus der Abteilung Bildung – ein Anlass, einen genaueren Blick darauf zu werfen.*

**W**ir sind wirklich sehr dankbar für die umfangreiche Unterstützung des Freundeskreises«, sagt der neue Leiter der Hauptabteilung Bildung, Lorenz Kampschulte. »Wir haben so viele Projekte, dass ich manchmal befürchte, der FFK führt irgendwann eine ›Bildungsquote‹ ein, damit auch andere Abteilungen zum Zug kommen«. Seine Angst ist natürlich unberechtigt, denn auch alle anderen Abteilungen reichen regelmäßig Projekte beim Freundes- und Förderkreis ein. Und dennoch galt der Bildungsabteilung des Museums seit unseren Anfängen im Jahr 2000 stets eine besondere Aufmerksamkeit.

Die Aufgabe der Hauptabteilung Bildung ist es, einerseits Angebote für Besucher zu erarbeiten und andererseits im Bereich Ausstellungsdidaktik Mitarbeiter zu

**Bild oben:** Ein junger Forscher untersucht das Licht einer Glühlampe am Spektrometer. Der Freundes- und Förderkreis unterstützt die zahlreichen Projekte und Angebote der Bildungsabteilung des Museums.

schulen sowie den verschiedenen Ausstellungsteams des Museums beratend zur Seite zu stehen. Da im Rahmen der Zukunftsinitiative alle Ausstellungen neu konzipiert werden, sind die Museumdidaktiker besonders gefordert. So zum Beispiel wirken sie derzeit bei der Neukonzeption von Schifffahrt und Robotik oder auch in der völlig neuen Ausstellung zur Landwirtschaft mit. »Es ist wichtig, dass wir von Anfang an dabei sind, denn dadurch lassen sich Bildungsprogramme punktgenauer realisieren.«

Der Freundeskreis hat beispielweise die Erarbeitung eines Schülerprogramms für die neue Dauerausstellung »Bild-Schrift-Code« mitfinanziert, die 2020 eröffnet wer-

den soll. Dort soll es acht Stationen mit speziellen Schüleraufgaben geben, etwa zur Kryptografie oder zur Frage, warum wir uns Bilder meist besser merken als Texte. Anamarija Tokic, die ursprünglich als Praktikantin das Projekt entwickelt hat, schreibt nun auch ihre Masterarbeit darüber. »Dieses Projekt ist ein typisches Beispiel, warum der Freundeskreis für uns so wichtig ist«, erklärt Kampschulte. Nur weil es die Unterstützung des Freundeskreises gibt, könne man auch verhältnismäßig kleine Ideen unkompliziert ausprobieren.

Um zu zeigen, wohin sich die Museumspädagogik entwickelt, erwähnt Kampschulte auch noch das 2019 anlaufende Projekt »SmartphoneScience«, das ebenfalls mit der Hilfe des Freundeskreises realisiert wird. »Smartphones sind voller Sensoren, doch was sie als Messgerät alles können und leisten, ist den wenigsten bewusst.« Deshalb werden Schüler (im Alter von 10 bis 15 Jahren) sich im ersten Teil des Programms anhand von Experimenten die Funktionsprinzipien verschiedener Sensoren (Kamera, Mikrofon, Beschleunigungssensoren etc.) erarbeiten. Anschließend sollen sie ihre Smartphones (oder die museumseigenen Leihgeräte) mittels der von der Uni Aachen entwickelten App »Phyphox« nutzen, um Messungen in den verschiedenen Abteilungen des Museums durchzuführen – etwa die Beschleunigung von Aufzügen oder die Frequenzen einer Schwebung in der Abteilung Physik messen, oder eine Lärmkarte des Hauses erstellen.

Bei dem Projekt geht es nicht nur darum, Schülern die Technik ihrer Lieblingsgeräte bewusster zu machen und das Thema Sensorik im Lehrplan der Sekundarstufe I zu unterstützen, beim »SmartphoneScience«-Projekt geht es vor allem um neue Möglichkeiten der Museumsdidaktik. »Wenn es klappt, dass die Schüler mit ihren eigenen Smartphones arbeiten können, dann können wir den Technologieträger Smartphone in Zukunft in unsere Programme integrieren«, erklärt Kampschulte. Beispielsweise gäbe es in der neuen Ausstellung zur Musik viele Anwendungsmöglichkeiten. Wie innovativ dieser museumsdidaktische Ansatz ist, beweist, dass die TU Kaiserslautern eine Promotionsstelle eingerichtet hat, die das »SmartphoneScience«-Projekt forschend begleiten soll.



Eines von vielen kleinen und größeren Projekten, die der Freundeskreis angeregt und unterstützt hat, ist die Museums-App.

Nähere Informationen unter:  
[www.ffk-deutsches-museum.de/de](http://www.ffk-deutsches-museum.de/de)

Als neuesten Trend in der Museumspädagogik sieht Lorenz Kampschulte aber weniger die neuen technischen Möglichkeiten der Digitalisierung und Multimedialisierung. »Das sind wichtige Hilfsmittel, aber was die Museen der Zukunft vor allem leisten müssen, ist, den Dialog mit den Besuchern zu intensivieren. Die persönliche Vermittlung ist ja unsere Hauptkompetenz.« Deshalb ist die Bildungsabteilung gerade dabei, eine sogenannte Explainer-School zu gründen, in der ausgewählte Mitarbeiter neue Vermittlungsstrategien lernen sollen, und zwar nicht nur, um noch bessere Führungen anbieten zu können, sondern um ausreichend Mitarbeiter im Museum für die Kommunikation mit den Besuchern bereitstellen zu können. »Die Besucher sollen das Gefühl haben, dass sie jederzeit ins Museum kommen können und dort Menschen finden, denen sie Fragen zu Naturwissenschaft und Technik stellen können, von Angesicht zu Angesicht.« In einer Welt der zunehmenden Digitalisierung von Kommunikation und Vermittlung ist es nicht nur folgerichtig, sondern ein kostbares Gut, sich das Museum als Ort des Gesprächs, der Diskussion und der Begegnung neu zu denken. Wir Freunde erleben das Deutsche Museum bereits heute als Zentrum des geistigen Austauschs zu wichtigen Fragen der Zukunft. Je stärker es das für alle Besucher werden kann, desto begeisterter wird dies vom Freundeskreis aufgenommen werden.

Monika Czernin

## Werden Sie Mitglied im Freundes- und Förderkreis des Deutschen Museums!

### Jahresbeitrag:

- 500 Euro für persönliche Mitgliedschaften
- 250 Euro für Juniormitgliedschaften (bis 35 Jahre)
- 2500 Euro für Mitgliedschaften mittelständischer Unternehmen nach EU-Norm
- 5000 Euro für Mitgliedschaften großer Unternehmen

### Kontakt:

Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum e.V. · Museumsinsel 1 · 80538 München  
[www.ffk-deutsches-museum.de/de](http://www.ffk-deutsches-museum.de/de)

### Ihre Ansprechpartnerin:

Claudine Koschmieder · Tel. 089/2179-314 · Fax 089/2179-425  
[koschmieder@ffk-deutsches-museum.de](mailto:koschmieder@ffk-deutsches-museum.de)



Die Astronomische Uhr über der Durchfahrt zur Zenneckbrücke.

# Die staade Zeit ist vorbei!

*Nach vier Monaten Restaurierung kehrt die Astronomische Uhr mitsamt ihren drei Glocken in den Hof des Deutschen Museums zurück*

**E**nde der Stille: Jetzt läutet es wieder im Viertelstundentakt im Museumshof. Nach vier Monaten Restaurierungszeit wurde die Astronomische Uhr mit den drei Glocken wieder in die Fassade über der Durchfahrt zur Zenneckbrücke eingebaut. Damit kehrt ein beliebter Blickfang und zuverlässiger Zeitgeber für Museumsbesucher und Passanten zurück.

Mitte September verstumten die viertelstündlichen Glockenklänge im Museumshof. Als für die Malerarbeiten am Bibliotheksgebäude ein Gerüst hochgezogen wurde, nutzten die drei Kollegen aus der Restaurierungswerkstatt für wissenschaftliche Instrumente die Gelegenheit, um das große Ziffernblatt der Astronomischen Uhr über der Durchfahrt zur Zenneckbrücke nach rund 80 Jahren zum ersten Mal abmontieren zu lassen.

Werkstattleiter Thomas Rebényi und sein Uhrmacher team haben zusammen mit den Experten von der Georg Rauscher Turmuhrfabrik aus Regensburg in den vergangenen Wochen sämtliche Teile des Zeitgebers begutachtet, gereinigt und – wo nötig – instandgesetzt. »Die letzte große Teilüberholung lag ja schon 20 Jahre zurück, damals war das Stundenzeigerrohr gebrochen und auch die Trägerkonstruktionen für die anderen Zeiger mussten wegen Rostschäden ersetzt werden«, erzählt Elisabeth Knott, die

Leiterin der zuständigen Abteilung Sammlungsunterhalt. Dieses Mal waren die Schäden nicht ganz so dramatisch. »Wir haben uns um das Uhrwerk gekümmert, das beinhaltet das Sekundenlaufwerk, das Minutenlaufwerk, das Viertel- und das Stundenschlagwerk, das Wochentags-, das Monats- und Mondlaufwerk«, sagt Thomas Rebényi. Bei den zahlreichen einzelnen Komponenten von teils recht unhandlichem Format war zuletzt der Aufwand der Montage durchaus erheblich und wäre ohne das Gerüst an der Fassade nicht möglich gewesen. »Allein der Stundenzeiger ist ja schon knapp vier Meter lang und wiegt fast 40 Kilo«, so Rebényi.

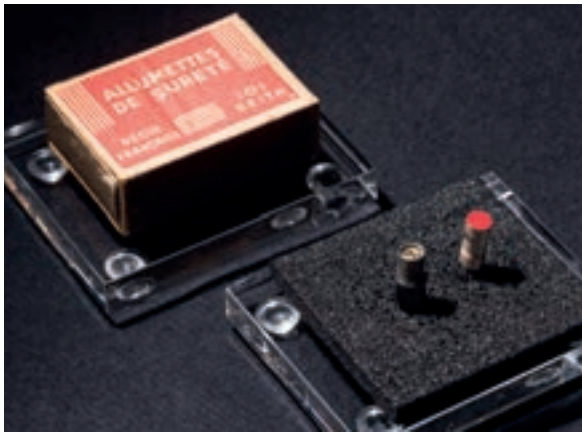
Nun erstrahlen Zeiger, Ziffernblätter, Tierkreiszeichen- und Wochentagsanzeige erneut in ihrem Glanz. Stück für Stück wurde wieder an seinen Platz in der Fassade gesetzt. »Nur auf die Mondkugel müssen wir noch warten, bis es etwas wärmer wird, weil deren Blende eingeputzt werden muss – und das geht nicht bei diesen Temperaturen«, erklärt Thomas Rebényi. Inzwischen ist immerhin das Gerüst aus dem Museumshof komplett verschwunden. Die Museumsbesucher und Passanten haben wieder freie Sicht und – dank der viertelstündlichen Glockenschläge – die Zeit nicht nur im Blick, sondern auch im Ohr. Die staade Zeit ist nun endlich auch auf der Museumsinsel vorbei.

## Daten und Fakten zur Astronomischen Uhr

- Baujahr: 1935
- Mechanischer und elektrischer Teil: J. Neher Söhne GmbH
- Modelle der Plastiken: Ernst Andreas Rauch, Ausführung in Kupfer Fa. Ehrenböck
- Schlagglocken (eine für den Stundenschlag, zwei kleinere für den Viertelschlag): Glockengießerei Franz Schilling Söhne (Apolda, Thüringen)
- Die Gewichte des Turmuhrwerks werden, von diesem mechanisch gesteuert, mit Hilfe eines Motors aufgezogen.
- Eine Sekundenpendeluhr steuert die elektromagnetische Auslösung des Sekunden- und des Minutenlaufwerks.
- Die drei Räderwerke für die Anzeige des Wochentags und des Monats sowie die Mondkugel sind mit dem Zeigerwerk der Turmuhr gekoppelt.
- Durchmesser Ziffernblatt: ca. 6,5 Meter
- Stundenzeiger: Länge 3,78 Meter, Gewicht 38 Kilogramm
- Minutenzeiger: Länge 4,32 Meter, Gewicht 36 Kilogramm
- Sekundenzeiger: Länge 1,26 Meter, Gewicht 2,5 Kilogramm

# Wie der Transistor nach Deutschland kam

*Das Deutsche Museum bekommt von Infineon ein kleines, aber bedeutendes Stück Technologiesgeschichte*



Der Transistor mit der Nummer 9 (li.) und der erste Nachbau der Firma Siemens vor der Streichholzschachtel, in der das Bell-Laboratories-Original jahrzehntelang aufbewahrt war.

Ohne ihn würde keiner unserer Computer funktionieren, kein elektronisches Gerät. In jedem heutigen Haushalt in Deutschland gibt es Millionen davon. Er gilt vielen als die genialste Erfindung des 20. Jahrhunderts: der Transistor. 1947 gelang es Wissenschaftlern in den Bell Laboratories in den USA, die ersten funktionierenden Transistoren zu bauen. Von diesen ersten Transistoren gelangte einer nach Deutschland – und ist jetzt im Deutschen Museum zu sehen.

Das unscheinbare Ding mit der handgeschriebenen Nummer 9 war 1952 in die Bundesrepublik gekommen und schlummerte bis 2006 in einer roten Streichholzschachtel. Es war der erste Transistor dieser Art, der seinen Weg nach Deutschland fand. Zu einem Zeitpunkt, als die neue Technologie kaum bekannt war – und schon gar nicht gekauft werden konnte. Mit in der Schachtel: ein handschriftlicher Zettel des Münchner Siemens-Mitarbeiters H. W. Fock vom 5. November 1952. »Einliegend senden wir Ihnen, wie verabredet, den Bell-Transistor 1768, Nr. 9.« Erst 2006 tauchte er wieder auf: Ein langjähriger Siemens-Mitarbeiter im Ruhestand hatte den Transistor bei sich zu Hause aufgehoben. Er präsentierte ihn seinen staunenden ehemaligen Kollegen und übergab ihn dem Historischen Archiv von Infineon.

Wie aber waren Siemens-Ingenieure schon im Mai 1952, gut vier Jahre nach der Erfindung, an den Transistor aus USA gekommen, obwohl das Produkt auf dem Markt noch gar nicht zu haben war? Das hat mit dem Kalten Krieg und der Anti-Trust-Politik der USA zu tun. Die Bell

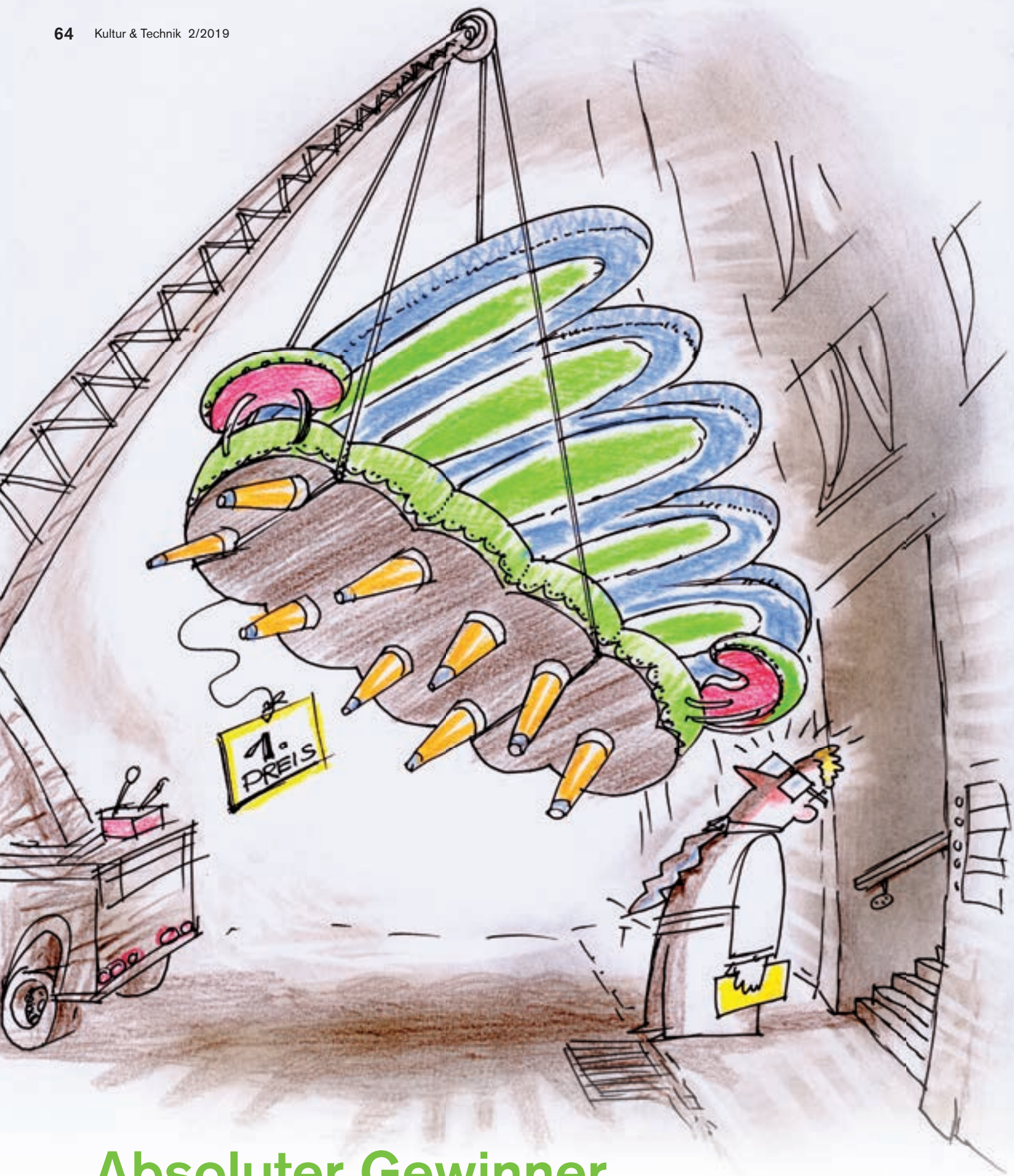


Hans-Joachim Schulze (li.), Senior Principal in der Entwicklung von Infineon, übergibt dem Generaldirektor des Deutschen Museums, Wolfgang M. Heckl, den Transistor.

Laboratories hatten für den Mai 1952 160 Wissenschaftler zu einem internationalen Transistoren-Symposium eingeladen. Dort stellten sie ihre Erfindung vor. Vier Teilnehmer der Siemens & Halske AG waren Teil des auserwählten Kreises – gegen eine stolze Gebühr von 25.000 Dollar. Die Teilnehmer – ausschließlich aus westlichen Ländern und Japan – hatten sich zu strikter Geheimhaltung verpflichtet, denn die USA wollten um jeden Preis verhindern, dass Informationen über die Zukunftstechnologie in die Hände des Ostblocks gelangten. Interessierte Firmen aus dem Westen wollte man dagegen als Lizenznehmer an dem Wissen teilhaben lassen. Nur: Warum gaben die Bell-Laboratorien ihren technologischen Vorsprung freiwillig auf und gaben den Siemens-Mitarbeitern sogar einen Transistor mit nach Deutschland?

Die Bell Laboratories bekamen ab 1949 staatliche Aufträge zur Erforschung der Transistortechnologie. In diesen Verträgen wurde die Verpflichtung verankert, die erzielten Forschungsergebnisse kostengünstig an Lizenznehmer weiterzugeben. Die USA wollten mit Staatsgeldern entwickelte Technologien auch anderen Firmen zugänglich machen. Auf diese Weise gelangte auch Siemens 1952 in den Besitz der neuesten Forschungsergebnisse aus den Bell Laboratories und einiger Muster von Bell-Transistoren. Schon Ende 1952 wurde entschieden, in München eine Halbleiterfabrik zu bauen – am späteren Standort Balanstraße. Die ersten bei Siemens ab 1953 hergestellten Spitztransistoren der Typen TS13 und TS33 sahen den Bell-Transistoren zum Verwechseln ähnlich. Siemens ist dann zu einem führenden Halbleiterunternehmen geworden, insofern hatten sich die 25.000 Dollar durchaus gelohnt.

Elektronik-Kurator Max Rößner hat einen kleinen Bereich in der jetzigen Ausstellung Mikroelektronik, auf der Empore gleich über der Informatik, eingerichtet. Hier gibt es einen Ausblick auf die künftige Dauerausstellung Elektronik, die 2020 eröffnen soll. In dieser kleinen Vorschau werden auch weitere Schätze ausgestellt: das Transistron der Apple 1, ein Arduino-Board der ersten Baureihe. Und ein kleines Diorama, das die HP-Garage – sozusagen den Geburtsort des Silicon Valley – zeigt. Wobei es ohne Transistor auch das Silicon Valley nie gegeben hätte.



# Absoluter Gewinner



Die Zeit ist gekommen, dass ausnahmsweise ich einmal an dieser Stelle das Wort ergreife. Der, der mich hier immer nur »Fräulein Schröder« nennt, ist »verhindert«. Das ist natürlich nur so eine Ausrede. Die Wahrheit ist, dass der, der mich immer nur »Fräulein Schröder« nennt (DDMINFSN), unter akuter Schreibblockade leidet, angeblich keinen einzigen klaren Gedanken fassen kann, findet, dass sowieso all seine Geschichten von nichts anderem als vom grandiosen Scheitern handelten, sein ganzes Leben in den Augen der anderen eigentlich eine ausgemachte Niederlage, ein Fehlschlag, im besten Falle nur ein Irrtum sein muss, weshalb er jetzt, wo er sich exakt zu diesem Thema äußern soll, nur noch ans Siegen denken könne, ans Erfolgreichsein, ans Gewinnen! Ich nenne ihn daher hier und heute, und auch weil mir DDMINFSN dann doch etwas zu sperrig ist, den Gewinner. Der Gewinner also liegt in Wahrheit auf der Couch und suhlt sich in seinem tiefschwarzen Verlierertum. Lassen wir ihn einfach da liegen. Kümmern wir uns nicht um ihn! Oder doch nur insoweit er Gegenstand einer Geschichte ist, die vom Erfolg handelt, vom Gewinnen.

Es ist nicht lange her, da kam der Gewinner in die Küche und wollte etwas ungeduldig wissen: »War die Post schon da?« Ich sagte: »Weiß nicht. Hab' noch nicht nachgeschaut.« Der Gewinner sagte: »Der Briefkasten ist leer. Vielleicht kommt da ja heute noch was.« »Ja«, sagte ich, »vielleicht kommt ja noch was.« Es kam dann aber nichts mehr. Am nächsten Tag wiederholte sich das und am übernächsten auch. »Hast du die Post schon rausgenommen? Der Briefkasten ist leer!« »Hab ich!«, sagte ich, »war aber nur Werbung.« »Was? Werbung? Wo hast du die hin?« Noch ehe ich »Altpapierkarton« sagen konnte, kniete der Gewinner bereits davor und wühlte darin herum. »Suchst du was?« »Mhmm«, murmelte der Gewinner in den Karton hinein, »muss so ein gelber Brief sein.« »Meinst du diesen hier? Der kam schon letzte Woche.« Ich hielt den Umschlag hoch, den ich als Einkaufszettel missbraucht hatte. Der Gewinner sah mich entgeistert an. »Spinnst du! Auf den warte ich seit Tagen!« Er schnappte sich den Brief und riss ihn auf. Seine Hände zitterten. Dann las er laut und deutlich vor: »Wir gratulieren! Sie haben gewonnen!« Er ließ das Blatt sinken, sah mich selig an, und las es noch mal. Dann explodierte er. »Ist das nicht WAHNSINN?! Hast du das gehört?! Ich habe GEWONNEN!!! Ich! Gewonnen! Wahnsinn, Wahnsinn, Wahnsinn. Mann, Mann, Mann! Ich! Ausgerechnet ich!« Er führte einen Tanz auf, dass die Gläser in der Vitrine klirrten. Er hüpfte und sprang und drehte sich um sich selbst und wedelte dabei mit dem Papier wie der wilde Wullewatz. Dann zog er mich vom Stuhl hoch und wirbelte mich nur so herum. »Darf ich mal fragen«, versuchte ich es zwischendurch, »was genau du da gewonnen hast?« Aber das schien der Gewinner nicht zu hören. »Was ich gewonnen habe?« sagte er schließlich ganz außer Atem. »Na den ersten Preis! Die Couchgarnitur aus der neuen Kollektion!« Ich gebe zu,

dass mich die Worte »Couchgarnitur aus der neuen Kollektion« mit etwas Sorge erfüllten. »Ich wusste gar nicht, dass du dir eine Couchgarnitur wünschst«, sagte ich. »Ich wünsche mir keine Couchgarnitur!«, sagte der Gewinner. »Ich wollte einfach nur gewinnen. Ich wollte herausfinden, ob das klappt.« »Du wolltest also – verstehe ich das richtig? – nur gewinnen um des Gewinnens willen und nicht etwa wegen einer neuen Couch?« »Exakt! Ich habe in meinem ganzen Leben noch nie etwas gewonnen. Ich wollte einfach mal erleben, wie das ist, wenn so ein Brief kommt und da steht ›Gratulation! Sie haben gewonnen!‹ Alle möglichen Leute kriegen immer irgendwelche Preise oder Auszeichnungen oder Reisen oder Geld. Nur ich nicht.« »Und warum ausgerechnet eine Couchgarnitur?« »Reiner Zufall. Ich hatte einfach beschlossen, dass ich das nächste Preisausschreiben mitmache, das mir begegnet.« »Und die Aufgabe? Was musstest du tun, um zu gewinnen?« Der Gewinner schwieg. Ich wiederholte die Frage. Schließlich sagte er: »Man musste ein Lösungswort einsenden. War ganz einfach.« »Du musstest ein Rätsel lösen?« »Na ja, nicht direkt. Ich musste nur die Anfangsbuchstaben aller Wörter in dem Satz zusammenfügen.« »Und was kam da raus?« »BUKSASPOP.« »Wie bitte?« »BUKSASPOP!« »Was soll das denn sein?« »Das waren die Anfangsbuchstaben für: Bei uns können Sie auch sonntags Probe sitzen oder Probe liegen.« »Und das hast du auf einer Postkarte eingeschickt und dann gleich gewonnen?« »Na ja, nicht direkt. Ich hab es mehrfach eingeschickt. Ich wollte meine Chancen erhöhen.« »Mehrfach? Was heißt mehrfach? Zehnmal?« »Nein, nicht zehnmal.« »20-mal? Na, sag schon!« »1000-mal. Ich hab 1000 Postkarten mit BUKSASPOP drucken lassen und mit meiner Adresse. Die hab ich dann losgeschickt.« Ich war sprachlos, und dem Gewinner war offensichtlich auch nicht mehr ganz so wohl in seiner Haut. Schlimm wurde es aber erst einige Tage später, als uns der erste Preis ins Haus geliefert wurde. Auch der Gewinner war der Meinung, dass diese ästhetische Katastrophe nicht in unser Wohnzimmer kommt. Wir haben die Teile dann originalverpackt in die Garage gestellt und auf einem Kleinanzeigenportal zum Verkauf angeboten. Es dauerte keinen halben Tag und sie war weg, für den Preis des Postkartenportos. »Das ist ja nochmal gerade gut gegangen«, sagte ich und der Gewinner meinte, wenigstens wisse er ja jetzt, wie es sich anfühlt zu gewinnen. Vielleicht hätte er das lieber nicht sagen sollen, denn es kam dann noch ein gelber Umschlag. Der Brief darin war weniger freundlich. Man habe, nachdem auch der zweite und der dritte Preis auf den Namen des Gewinners gezogen worden war, festgestellt, dass der Gewinner gegen die Teilnahmebedingungen verstoßen habe, weshalb er jetzt weder den zweiten und dritten Preis zugesprochen bekomme, noch den ersten Preis behalten dürfe. Dieser würde in den nächsten Tagen vom Spediteur abgeholt werden. Der Gewinner sagte nur noch: »Jetzt weiß ich immerhin auch, wie es sich anfühlt, wenn man alle drei Preise gewinnt.« ■

*Text:*  
*Daniel Schnorbusch*

*Illustration:*  
*Michael Wirth*



DER AUTOR

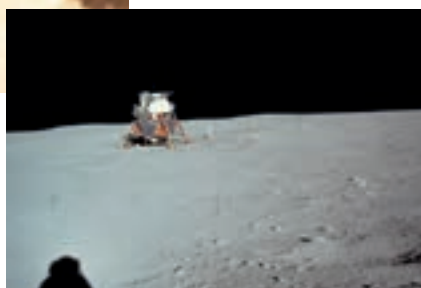
**Dr. Daniel Schnorbusch**  
geboren 1961 in Bremen, aufgewachsen in Hamburg, Studium der Germanistischen und Theoretischen Linguistik, Literaturwissenschaft und Philosophie in München, ebendort aus familiären Gründen und nicht mal ungern hängengeblieben, arbeitet als Lehrer, Dozent und freier Autor.



Countdown: Eine Saturn-V-Rakete hob am 16. Juli 1969 vom Kennedy Space Center ab. An Bord waren der Leiter der Mission Neil Armstrong und die Piloten Michael Collins und Edwin Aldrin. Die Saturn V war unter Leitung Wernher von Brauns als eines der leistungsstärksten Trägersysteme der Raumfahrt entwickelt worden.



Die Besatzung der Apollo 11: Neil Armstrong, Michael Collins und Edwin Aldrin.



»The Eagle has landed«: Im Mare Tranquillitatis, dem Meer der Ruhe, setzte die Landefähre der Apollo-mission 11 auf.

## Aufbruch zum Mond

Wer einen Fernseher besaß, dürfte am 20. Juli 1969 um 3.54 Uhr MEZ davor gesessen haben. Ich erinnere mich noch gut daran, wie wir Kinder – ich war gerade 10 Jahre alt geworden – aus dem Schlaf geweckt wurden, um dieses unglaubliche Ereignis live mitverfolgen zu dürfen. Die Bilder flimmerten unscharf über den Bildschirm und die fremdländischen Stimmen klangen wie aus einer Blechdose heraus, aber irgendwie war uns klar, dass wir in diesem Moment einem wahrhaft historischen Ereignis beiwohnen durften: Der Mensch hatte den Mond betreten. Ein Sehnsuchtsort, den wir bisher nur als freundlich-brummigen Gesellen aus dem *Kleinen Häwelmann* kennengelernt hatten. Aber da war nun nicht mehr das Bettchen, mit dem der kleine Ausreißer dem Mond über die Nase fuhr, sondern ein echtes Mondauto. Vermummte Menschen mit riesigen Helmen bewegten sich seltsam schwebend über seine Oberfläche. Und der Mond selbst entpuppte sich als eher trostlose Stein- und Sandwüste.

50 Jahre sind seither vergangen. Sechs Apollomissionen erreichten zwischen 1969 und 1972 den Mond. Seither hat kein Mensch mehr den Mondboden betreten. Erst in jüngster Zeit rückt unser nächster Begleiter wieder stärker ins Interesse der Öffentlichkeit. Und heute wie damals geht es vor allem darum, Macht und technisches Potenzial zu demonstrieren. Am 15. Januar 2019 landete die chinesische Mondsonde »Chang'e 4« erfolgreich auf der bisher unbekanntem Rückseite des Mondes. Freuen Sie sich auf die Sommerausgabe Ihres Mitgliedermagazins, das wissenschaftliche, technische, politische und kulturelle Facetten des Mondes beleuchtet wird. Und begleiten Sie uns auf einen Spaziergang an all die Orte, an denen der Mond im Deutschen Museum eine Rolle spielt.

Es grüßt Sie  
Ihre Sabrina Landes

## Impressum

### Das Magazin aus dem Deutschen Museum

43. Jahrgang  
Herausgeber: Deutsches Museum München  
Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl  
Museumsinsel 1, 80538 München  
Postfach 80306 München  
Telefon (089) 2179-1  
www.deutsches-museum.de

Verantwortlich: Dr. Stefan Bollmann (Verlag C.H.Beck oHG)  
Wissenschaftliche Beratung: Dr. Christian Sicka

Redaktionsleitung: Sabrina Landes | publishNET, Hofer  
Straße 1, 81737 München, redaktion@publishnet.org;  
Redaktion: Birgit Schwintek (Grafik), Inge Kraus (Bild),  
Andrea Bistrich (Korrektur), Hannah Schnorbusch  
(Schlussredaktion)

Verlag: Verlag C.H.Beck oHG, Wilhelmstraße 9, 80801 München;  
Postfach 400340, 80703 München, Telefon (089)  
38189-0, Telefax (089) 38189-398, www.chbeck.de

Redaktioneller Beirat: Dr. Frank Dittmann (Kurator  
Energietechnik, Starkstromtechnik, Automation), Gerrit  
Faust (Leiter Presse- und Öffentlichkeitsarbeit), Melanie  
Jahreis, Prof. Dr. Elisabeth Vaupel (Forschungsinstitut)

Herstellung: Bettina Seng, Verlag C.H.Beck oHG

Anzeigen: Bertram Götz (verantwortlich), Verlag C.H.Beck  
oHG, Anzeigenabteilung, Wilhelmstr. 9, 80801 München;  
Postfach 400340, 80703 München; Diana Wendler, Telefon  
(089) 38189-598, Telefax (089) 38189-599. Zurzeit gilt An-  
zeigenpreisliste Nr. 35.

Repro: Rehbrand Medienservice GmbH, Hauptstraße 1,  
82008 Unterhaching

Druck, Bindung und Versand: Holzmann Druck GmbH &  
Co. KG, Gewerbestraße 2, 86825 Bad Wörishofen

Bezugspreis 2019: Jährlich 29,- Euro  
Einzelheft 8,90 Euro, jeweils zuzüglich Versandkosten

Für Mitglieder des Deutschen Museums ist der Preis für  
den Bezug der Zeitschrift im Mitgliedsbeitrag enthalten  
(Erwachsene 52,- Euro, Schüler und Studenten 32,- Euro).  
Erwerb der Mitgliedschaft: schriftlich beim Deutschen Mu-  
seum, Postfach 80306 München.

Für Mitglieder der Georg-Agricola-Gesellschaft zur För-  
derung der Geschichte der Naturwissenschaften und der  
Technik e.V. ist der Preis für den Bezug der Zeitschrift im  
Mitgliedsbeitrag enthalten. Weitere Informationen: Georg-  
Agricola-Gesellschaft, Institut für Wissenschafts- und Tech-  
nikgeschichte, TU Bergakademie Freiberg, 09596 Freiberg,  
Telefon (03731) 393406

Bestellungen von Kultur & Technik über jede Buchhand-  
lung und beim Verlag. Abbestellungen mindestens sechs  
Wochen vor Jahresende beim Verlag.

Abo-Service: Telefon (089) 38189-679

\*\*\*\*\*

Die Zeitschrift erscheint vierteljährlich. Sie und alle in  
ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urhe-  
berrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der  
engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes bedarf der  
Zustimmung des Verlags. Der Verlag haftet nicht für  
unverlangt eingesandte Beiträge und Bilddokumente.  
Die Redaktion behält sich vor, eingereichte Manuskrip-  
te zu prüfen und ggf. abzulehnen. Ein Recht auf Ab-  
druck besteht nicht. Namentlich gekennzeichnete Bei-  
träge geben nicht die Meinung der Redaktion wieder.

ISSN 0344-5690

HÖRTEST ■ HÖRBERATUNG ■ HÖRGERÄTE ■ GEHÖRSCHUTZ

www.audilogik.de



# Mein winzig kleines Hörgeheimnis

Erleben Sie jetzt die Hörtechnik, die das Verstehen erleichtert und Ihnen so mehr Lebensqualität schenkt.

Und dies jetzt mit Hörgeräten, die so klein sind, dass sie sogar im Ohr verschwinden können und modernster Opn-Technologie, die ein 360°-Klang-Erlebnis und bestes Sprachverstehen auch in einer lärmintensiven Umgebung ermöglicht.

Probieren Sie es aus!

Oticon  
Opn™ Im-Ohr-  
Hörgeräte jetzt  
kostenlos  
testen!



► In unseren Fachzentren beraten wir Sie gerne persönlich:

**KARLSPLATZ**

Neuhauser Str. 47

Tel.: (089) 543 28 94 1

**SENDLINGER TOR**

Pettenkoferstr. 5

Tel.: (089) 515 14 88 6

**PLANEGG**

Bräuhausstr. 4a

Tel.: (089) 864 87 20 8

**AUDILOGIK**

Fachzentren für Hörgeräte

München-Sonnenstr. 13 - die wichtigste Adresse für Haus- und Wohnungseigentümer



„Ihr Berater in allen Fragen rund um Haus + Grund“

# HAUS+GRUND MÜNCHEN

HAUS- UND GRUNDBESITZERVEREIN MÜNCHEN und Umgebung e.V.



## Die Mitarbeiter der Rechtsabteilung

(v.l.n.r.): Reihe vorne: RA Harald Spöth, RA Michael Koch – stellvertr. Vorsitzender, RA Rudolf Stürzer – Vorsitzender Haus + Grund München, RAin Ariane Schlegel, RAin/StBin Agnes Fischl, RAin Claudia Finsterlin, RAin Anna-Lena Kretschmer-Tonke, RAin Martina Westner, RAin Melanie Sterns-Kolbeck, RA Simon Koch, RA Detlef Sterns | Reihe mitte: RAin Andrea Nasemann, RA Georg Hopfensperger, RAin Birgit Noack, RAin Kathrin Gerber, Dipl.-Ing. Andreas Heisler, RA Martin Sauer, RA Francesco di Pace, RA Bernhard Stocker, Dipl.-Arch. Andrea Lange | Reihe hinten: RA Dr. Benjamin Merkel, Dipl.-Ing. Gerhard Feldmann, RAin Astrid Congiu-Wehle

- Über 34.000 Mitglieder mit mehr als 420.000 Wohnungen und Geschäftsräumen in München und Umgebung
- Kostenfreie Rechts- und Steuerberatung rund um die Immobilie durch 22 spezialisierte Rechtsanwälte und Steuerberater
- Bau-, Modernisierungs- und Energieberatung, Wohnungsabnahmen
- Telefonische Beratungshotline
- Bewertung von Immobilien nach der Erbschaftsteuerreform
- Mietverträge für Wohnungen, Geschäftsräume und Garagen  
Musterbriefe für Betriebskostenabrechnungen, Mieterhöhungen, Kündigungen, Mieter-Selbstauskunft, Modernisierungsankündigungen, etc.
- **Alle Mietverträge und Musterbriefe online im Internet**  
Infos unter [www.haus-und-grund-muenchen.de](http://www.haus-und-grund-muenchen.de)
- **Mieter-Bonitätsprüfung online am PC**  
mit der Datenbank der Bürgel-Gruppe (ca. 39 Mio. Daten)
- **Ergebnis in wenigen Minuten, € 10,- pro Abfrage**  
auch für private Vermieter
- Mitgliederbeitrag ab € 60,- jährlich, einschließlich monatlich erscheinender Fachzeitschrift

Wir senden Ihnen gerne unsere umfangreiche Informationsbroschüre zu.

HAUS + GRUND MÜNCHEN · Sonnenstraße 13/III · 80331 München

Telefon 089 / 55 141-0 · Fax 089 / 55 141-366

[www.hug-m.de](http://www.hug-m.de) · [info@hug-m.de](mailto:info@hug-m.de)