

NOBELPREIS FÜR MEDIZIN

Überlebenskünstler im Magen

Mit dem Nachweis, dass ein Bakterium Hauptverursacher von Magenschleimhautentzündungen und -geschwüren ist, machten zwei australische Wissenschaftler diese oft chronischen Leiden heilbar. Dafür erhielten sie nun den Medizin-Nobelpreis.

Von Achim G. Schneider

Liebe geht bekanntlich durch den Magen. Bei Barry Marshall galt das auch für die Liebe zur Forschung. Mit der Behauptung, das Bakterium *Helicobacter pylori* sei der Urheber von Entzündungen der Magenschleimhaut, hatte der junge Wissenschaftler viel Widerspruch und Spott geerntet. Um seine kritischen Fachkollegen zu überzeugen, entschloss er sich deshalb zu einem Experiment der besonderen Art: Er trank von der Brühe mit dem Erreger, den er zuvor im Reagenzglas angezchtet hatte.

Nach wenigen Tagen stellte sich die erhoffte Wirkung ein. Marshall wälzte sich mit Unterleibskoliken, erbrach sich und hatte einen fauligen Atem. Kein Zweifel – er litt an einer schweren Gastritis. Der Nobelpreis dürfte ihn nun für das einstige Ungemach entschädigen; denn sein heroischer Selbstversuch trug maßgeblich zur Anerkennung der Hypo-

these bei, die er und sein Mentor J. Robin Warren aufgestellt hatten.

Warum war es so schwierig, die Wissenschaftsgemeinde zu überzeugen? Bis in die 1980er Jahre herrschte die allgemeine Überzeugung, den widrigen Bedingungen im Magen könne kein Lebewesen trotzen. Denn ein Cocktail aus Salzsäure und Enzymen zersetzt dort vom Rohgemüse zum Rindersteak alles, was hineingelangt – mit der Nahrung einverleibte Bakterien inbegriffen. Dass irgendein Organismus ausgerechnet dieses unwirtliche Milieu als Lebensraum wählen könne, schien ausgeschlossen.

Als Verursacher von Gastritis und Magengeschwüren galten damals Ärger, Stress oder scharf gewürzte Speisen. Diese führten, so die Lehrmeinung, zur vermehrten Ausscheidung von Magensäure, die schließlich die Magenwände angreife. Die Erfahrung schien das zu bestätigen. Gegen Gastritis halfen Medikamenten, die einer Übersäuerung des Magens

entgegenwirken. Wurden sie abgesetzt, kehrten die Beschwerden zurück.

Auch Warren, Pathologe am Royal Perth Hospital (Australien), war zunächst überrascht, als er 1979 in Gewebeproben von Patienten mit Magengeschwüren kleine, gekrümmte Bakterien fand (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 22, und 4/1996, S. 68). Interessanterweise beschränkten sie sich auf Stellen, wo die Magenschleimhaut entzündet war.

Warren stellte den jungen Kollegen Marshall ein, der gemeinsam mit ihm den seltsamen Erreger kultivieren sollte. Doch alle Versuche schlugen fehl. Erst die Osterfeiertage 1982 brachten den Durchbruch. Versehentlich waren die Kulturen länger als gewöhnlich im Brutschrank geblieben. Dies gab *H. pylori* endlich genügend Zeit, zu einer Kolonie heranzuwachsen, bevor die Experimentierenden die Geduld verloren und den Versuch abbrachen.

Heroischer Selbstversuch

Die Gegner der Infektionshypothese blieben dennoch skeptisch: Auch wenn *H. pylori* im Magen überleben könne, beweise das noch lange nicht, dass es wirklich die Entzündung verursache. Genauso gut könne sich das Bakterium als Opportunist nachträglich einnisten, wenn die Magenwand durch Entzündung oder Geschwür bereits geschädigt sei. Diesen Einwand widerlegte Marshall schließlich mit seinem spektakulären Selbstversuch.

Heute weiß man, dass vier Fünftel aller Magengeschwüre durch *H. pylori* verursacht werden. Das Gleiche gilt für chronische Gastritis. Geschwüre des Zwölffingerdarms gehen sogar bei neun von zehn Patienten auf das Konto des Bakteriums. Wenn die dauerhaft entzündeten Zellen schließlich entarten, kann es zu einem lebensbedrohlichen Tumor kommen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die beiden Australier Barry Marshall (rechts) und J. Robin Warren brachten das Dogma zu Fall, wonach Bakterien in der lebensfeindlichen Magensäure nicht überleben können. Dabei hatten deutsche Wissenschaftler im 19. Jahrhundert *Helicobacter pylori* bereits im Mikroskop beobachtet – eine Erkenntnis, die in Vergessenheit geraten war.

▶ Mit seinen starken Flagellen kann sich *H. pylori* – hier künstlich angefärbt – im Magenschleim fortbewegen und dabei Stellen aufsuchen, an denen das angenehmste Milieu für den Erreger herrscht.

Marshall's schmerzhaftes Magenschleimhautentzündung klang übrigens von selbst wieder ab. Weniger Glück hatte sein neuseeländischer Kollege, der ebenfalls Versuchskaninchen spielte. Drei Jahre dauerte es, bis der Medikamentencocktail gefunden war, der ihn schließlich von dem Eindringling und der durch ihn ausgelösten Gastritis befreite. Darin waren zwei Antibiotika mit einem Wismut-Präparat kombiniert, das den Säuregehalt im Magen verringert.

Fortan konnten Gastritis und Magengeschwüre nicht nur behandelt, sondern gänzlich ausgeheilt werden. Das erlöste viele Erkrankte von einem oft jahrzehntelangen Leiden. Wird heutzutage bei einer Gastritis *H. pylori* diagnostiziert, kann der Patient durch Behandlung mit den drei Wirkstoffen fast stets innerhalb einer Woche den lästigen Untermieter loswerden.

Inzwischen ist auch geklärt, wie es das Bakterium schafft, sich in seiner lebensfeindlichen Umgebung zu behaupten. Um der aggressiven Säure zu entgehen, lebt es vorzugsweise im Magenschleim, welchen die Schleimhautzellen absondern, um sich vor einer Selbstverdauung zu schützen. Ferner kann *H. pylori* mit dem Enzym Urease, das den im Magen reichlich vorhandenen Harnstoff in Ammoniak umwandelt, die Magensäure in seiner unmittelbaren Umgebung neutralisieren. Mit seinen Geißeln ist der Keim zudem mobil und im Stande, Stellen mit für ihn günstigem Milieu aufzusuchen.

Wie man heute weiß, tritt *H. pylori* in verschiedenen Stämmen auf. Einige besonders pathogene können über eine nadelartige Struktur einen Eiweißstoff namens CagA in Schleimhautzellen injizieren und diese so dazu bringen, weniger Magensäure zu produzieren. Die Gefährlichkeit eines Stamms hängt außerdem davon ab, über welche Variante des Proteins VacA er verfügt. Aggressive Formen dieses Toxins fressen Löcher in die Schleimhautzellen und rufen so Entzündungen hervor. Gleichzeitig schalten sie



MIT FROLD. GEN. VON ZACAPAC, ABBOTT / ALTANA

gegen den Erreger gerichtete Immunzellen aus.

Über den Verlauf einer Infektion mit *H. pylori* entscheidet aber auch die genetische Ausstattung des Betroffenen. Wenn die aggressivste Variante des Erregers auf eine besonders empfängliche Person trifft, kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Magengeschwüren, die im schlimmsten Fall zu Magenkrebs führen können.

Ein Schädling mit nützlichen Seiten

H. pylori gehört zu den Erregern mit der größten Verbreitung auf dem Globus. Doch gibt es große regionale Unterschiede in seiner Häufigkeit. In Entwicklungsländern beherbergt fast die gesamte erwachsene Bevölkerung das Bakterium, in Europa dagegen nur noch rund ein Drittel. Der Grund für den Rückgang sind vor allem eine verbesserte Hygiene sowie der verbreitete Einsatz von Antibiotika.

Aber wären wir wirklich alle gesünder, wenn es gelänge, *H. pylori* auszurotten? Wissenschaftler wie Martin J. Blaser von der New-York-Universität bezweifeln das (Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 82). Zwar begrüßen sie, dass mit dem stetigen Rückgang des Erregers im 20. Jahrhundert auch Magengeschwüre und Magenkrebs seltener geworden sind. Dafür haben jedoch Tumore und andere schwere Erkrankungen der Speiseröhre zugenommen. Dazu zählt

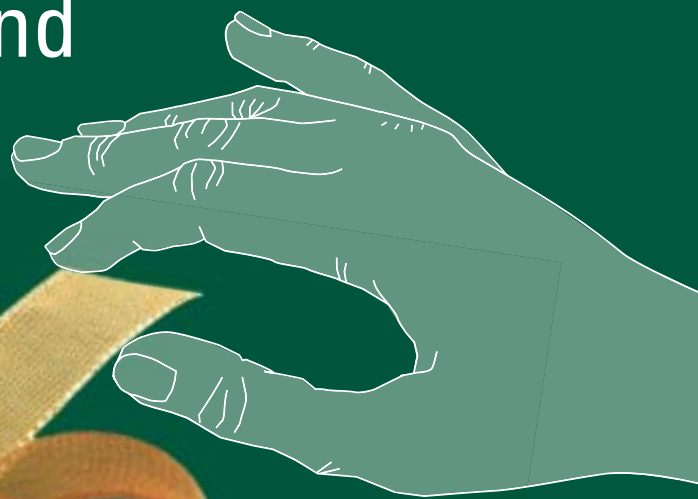
insbesondere die Refluxkrankheit, bei der Magensäure in die Speiseröhre aufsteigt.

Tatsächlich erhöhen *H. pylori*-Stämme, die Magenzellen über Jahrzehnte mit dem CagA-Protein malträtieren, zwar das Risiko, dass diese irgendwann entarten. Doch sie helfen auch gegen Übersäuerung im Verdauungsorgan. Wurde der Erreger mit Antibiotika ausgerottet, kann er Spitzenwerte an Magensäure nicht mehr abfangen. Dies zieht möglicherweise eine Erkrankung der Speiseröhre nach sich. Dafür sprechen Ergebnisse wissenschaftlicher Studien. Demnach erkrankten Träger des CagA-Stamms seltener an aggressiven Schleimhautkarzinomen der unteren Speiseröhre und des Mageneingangs als Menschen, die mit einer harmloseren Variante infiziert sind.

Marshall und Warren haben uns Einsichten in das Leben eines Magenbewohners vermittelt, von dessen Existenz wir bis vor 25 Jahren nichts ahnten. Bevor wir aber hingehen und groß angelegte Kampagnen zur Ausrottung des unbequemen Gasts starten, sollten wir ihn erst einmal genauer kennen lernen. Möglicherweise tun wir ja besser daran, uns mit ihm zu arrangieren – indem wir für die Verbreitung von Stämmen sorgen, die mehr Nutzen bringen, als sie Schaden anrichten.

Achim G. Schneider ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Wissen aus erster Hand



Ein Geschenk, das Freu(n)de macht!



Das ganze Spektrum der Wissenschaft: kompetent, verständlich, authentisch



Das populäre Magazin für Astronomie und Raumfahrt



Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung



Information und Kompetenz in Sachen Astronomie und Weltraumforschung



Die tägliche Wissenschaftszeitung im Internet: aktuell, verständlich, unterhaltsam

- ▶ Verknüpfen Sie Angenehmes mit Nützlichem und gönnen Sie sich oder einem guten Freund mit einem Abonnement ein Lesevergnügen der Extraklasse.
- ▶ Als Dank für Ihre Bestellung schenken wir Ihnen wahlweise den Bildband »Wunder des Weltalls« (Hardcover) oder das Buch »Der kleine wissenschaftliche Weihnachtsbegleiter«.
- ▶ Das erste Heft des Geschenkabonnements verschicken wir mit einer schönen Grußkarte in Ihrem Namen.



www.spektrum.de/abo



Prämierte Überzeugung!

- ▶ Sind Sie Leser von einem oder von mehreren unserer Magazine?
- ▶ Finden Sie, dass Wissenschaftsmagazine eine Bereicherung in der oftmals oberflächlichen Medienwelt sind?
- ▶ Müssen Informationen aus der Forschung für Sie nicht nur aktuell, sondern auch seriös und überprüfbar sein sowie weiterführende Quellen und Links beinhalten?
- ▶ Sollen Ihrer Meinung nach viel mehr Leute regelmäßig in Bildung investieren?
- ▶ Können sie diese Fragen mit JA beantworten, dann sind SIE die Person, die wir suchen!
- ▶ Denn Ihnen dürfte es ein Leichtes sein, eine Freundin oder einen Freund für ein Jahresabo eines unserer Magazine zu begeistern – und sich selbst damit eine attraktive Dankesprämie nach Ihrer Wahl zu sichern:



128 MB USB 1.1-Stick Silver

Der USB-Stick mit Passwortschutz ermöglicht ein bequemes externes Abspeichern von Daten. Lieferung inklusive Verlängerungskabel und Trageband (ab Win 98 und höher).



Universalgutschein BestChoice

Einlösbar bei bis zu 100 Anbietern wie z. B. Amazon, IKEA, Douglas, OBI oder WOM. Umtausch gegen Bargeld ist ausgeschlossen.



Lernen. Gehirnforschung und die Schule des Lebens

Das Buch von Manfred Spitzer, Direktor der psychiatrischen Uniklinik Ulm, richtet sich an Menschen, die wissen wollen, wie die Lernmaschine in unserem Kopf eigentlich arbeitet und zu nutzen ist.



Einkaufskorb von Reisenthel

Mit wenigen Handgriffen können Sie den mokkafarbenen Einkaufskorb von Reisenthel platz sparend zusammenfalten. Füllvolumen: 25 Liter, Belastbarkeit: bis 35 Kilogramm. Lieferung ohne Inhalt.

Bestellen Sie mit nebenstehender Karte, telefonisch unter 06221 9126-743, per Fax 06221 9126-751, per E-Mail marketing@spektrum.com oder im Internet

www.spektrum.de/abo

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3-5 | D-69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Heidelberg | HRB 8114 | Abonnementsverwaltung: Zenit Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | D-70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn





Von Sirius zum Laserkamm

Als »Vater der Quantenoptik« erhält Roy J. Glauber die Hälfte des diesjährigen Physik-Nobelpreises. Die andere Hälfte teilen sich John L. Hall und Theodor W. Hänsch für die Entwicklung einer hochgenauen Methode zur Messung von Lichtfrequenzen.

Von Oliver Morsch

Als am 6. Oktober in Harvard der Ig-Nobelpreis – der »Anti-Nobelpreis« für die sinnloseste oder amüsanteste Forschung der jüngsten Zeit – zum 15. Mal vergeben wurde, fehlte bei der Schlusszeremonie ein vertrautes Gesicht. Der Mann hatte über viele Jahre die Papierflieger weggefeht, die traditionsgemäß am Ende der Veranstaltung auf die Bühne geworfen werden. Die Entschuldigung für sein Fernbleiben war allerdings überzeugend: Roy J. Glauber, der fleißige Bühnenkehrer, hatte zwei Tage zuvor den Nobelpreis für Physik gewonnen – den »richtigen«. Wenn er im Dezember zur Preisverleihung nach Stockholm reist, wird er dort seinen amerikanischen Landsmann John L. Hall und den Deutschen Theodor W. Hänsch treffen. Die drei erhielten die begehrte Auszeichnung gemeinsam für Arbeiten, die zu einem besseren Verständnis des Lichts und zu neuartigen optischen Messverfahren geführt haben.

Dass das Nobelkomitee genau ein Jahrhundert nach Albert Einsteins grundlegender Veröffentlichung über die Quantennatur der elektromagnetischen Strahlung drei Experten auf dem Gebiet der Quantenoptik ehrt, mag Zufall sein

oder nicht – in jedem Fall ist es sehr passend. Schon mehrmals wurde der Nobelpreis seit seiner Einrichtung im Jahr 1901 für Entdeckungen verliehen, die mit Licht zu tun hatten. Die Themen reichten von der Farbfotografie über Befeuungsanlagen für Leuchttürme bis hin zur Holografie. Auch Einstein selbst, der gleich mehrere Disziplinen der Physik revolutionierte, bekam den Preis 1921 für seine Arbeiten zum photoelektrischen Effekt (und nicht, wie manche glauben, für seine Relativitätstheorien). Vier Jahre später wurde Glauber geboren, den viele seiner Kollegen und Schüler heute als Vater der Quantenoptik bezeichnen.

Anregung aus dem Weltall

Er hat entscheidend dazu beigetragen, die Idee der Lichtquanten ab 1960 konsequent auszubauen. Dass die Quantentheorie auch elektromagnetische Wellen beschreibt, war zwar seit ihrer Entwicklung in den 1920er Jahren klar, doch in der Praxis spielten die Quanten des Lichts – die Photonen – keine große Rolle. Fast alle optischen Experimente ließen sich mit der von James Clerk Maxwell schon im 19. Jahrhundert entwickelten Theorie des Elektromagnetismus erklären; der Welle-Teilchen-Dualismus blieb weitgehend auf die Physik der Elementarteilchen beschränkt.

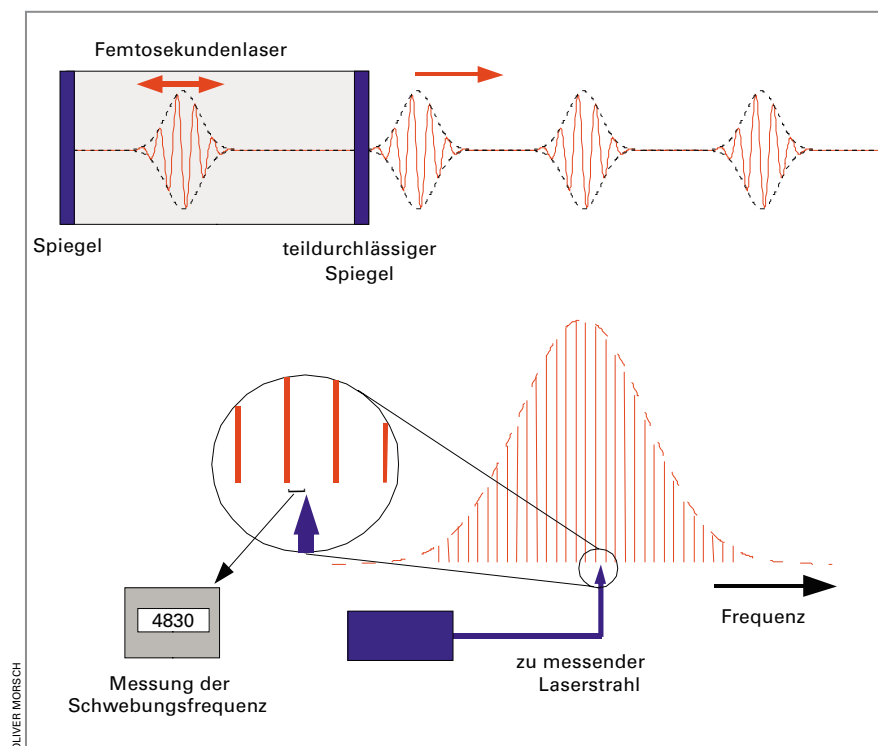
Die Anregung dazu, auch die Teilchennatur des Lichts ernst zu nehmen, kam schließlich in den 1950er Jahren – aus dem Weltall. Um den Durchmesser des »Hundssterns« Sirius zu ermitteln, beobachteten Robert Hanbury Brown und Richard Twiss das von ihm ausgesandte Licht mit zwei Detektoren, die im Abstand von einigen Metern aufgestellt waren. Dabei machten sie eine interessante Entdeckung: Die wenigen Lichtteilchen, die pro Sekunde von Sirius aus die Erde erreichten, ließen die beiden Detektoren bevorzugt zeitgleich anschlagen – es war also wahrscheinlicher, dass Detektor 1 ein Photon nachwies, wenn Detektor 2 zur gleichen Zeit ebenfalls ein Signal gab.

Obwohl sich dieser Effekt auch mit klassischen Wellen erklären ließ, interpretierte Glauber ihn als Beleg für die Quantennatur des Lichts und entwickelte einen Formalismus, mit dem sich die »Kohärenz« der auf die beiden Detektoren treffenden Photonen berechnen ließ. Seine Überzeugung: »Wer (Licht-)Quanten beschreiben will, kommt um die Quantenmechanik nicht herum.«

Während Glauber also die theoretischen Grundlagen der Kohärenz in der

Der Physik-Nobelpreis ging an drei prominente Vertreter der Quantenoptik: Roy J. Glauber (links) von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), John L. Hall (rechts) von der Universität von Colorado in Boulder und Theodor W. Hänsch, der am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und an der Universität München tätig ist.

Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.



Quantenoptik erarbeitete, benutzten Hall und Hänsch – teils unabhängig voneinander, teils in Zusammenarbeit – in den 1990er Jahren kohärente Laserstrahlen dazu, die Frequenz von Licht äußerst genau zu messen. Zuvor war das eine knifflige Sache gewesen. Im Prinzip geht es darum, zu zählen, wie viele Schwingungen ein physikalisches System pro Sekunde macht. Das exakte Stoppen der Zeit ist dabei noch das geringste Problem, dafür kann man eine Atomuhr benutzen. Doch das Abzählen der Lichtschwingungen erweist sich als heikel: Kein elektronischer Schaltkreis ist schnell genug, die mehreren hundert Billionen Oszillationen zu registrieren, die eine Lichtwelle in der Sekunde ausführt.

Das Uhrwerk einer Atomuhr besteht aus Cäsiumatomen, deren Mikrowellenfrequenz in einem bestimmten Zustand als Zeitnormal definiert ist. Eine solche Uhr aber tickt »nur« etwa zehn Milliarden Mal pro Sekunde, also zehntausendmal langsamer, als Licht schwingt. Mit ihr die Frequenz einer Lichtwelle direkt messen zu wollen ähnelt somit dem Versuch, mit einer Sanduhr und einer Strichliste die Drehzahl eines Formel-1-Motors zu ermitteln.

Ein möglicher Ausweg besteht darin, ein »Übersetzungsgetriebe« zwischen der langsamen Atomuhr und den schnellen Lichtschwingungen zu bauen. In den

Ein Femtosekundenlaser (oben) erzeugt extrem kurze Lichtpulse. Deren Frequenzspektrum (unten) besteht aus einer Reihe schmaler Linien mit gleichmäßigem Abstand, welche einen »Kamm« bilden. Um die Frequenz eines anderen Laserstrahls zu messen, muss man lediglich die Schwebungsfrequenz zwischen diesem und einer Linie des Frequenzkamms bestimmen.

1980er Jahren wurden zu diesem Zweck so genannte Frequenzketten konstruiert, die ganze Labors ausfüllten. Ihre einzige Aufgabe bestand darin, das Ticken einer Atomuhr über mehrere Zwischenschritte, in denen Frequenzen jeweils vervielfacht wurden, so weit auf Touren zu bringen, dass es schließlich schnell genug war, um mit den Oszillationen des zu messenden Lichts mithalten zu können. Wollte man allerdings eine andere Frequenz messen – zum Beispiel von blauem anstatt von rotem Licht –, so musste man eine völlig neue Kette aufbauen.

Es liegt auf der Hand, dass sich nur wenige Labors eine derart aufwändige und kostspielige Technik leisten konnten. John Hall und Theodor Hänsch beendeten diesen Zustand, indem sie mit nur einem Laser auf einen Schlag mehrere Millionen Frequenzketten entste- ▷

ANZEIGE

▷ hen ließen, die noch dazu auf einen einzigen Labortisch passten.

Dafür verwendeten sie einen so genannten Femtosekundenlaser. Der sendet nicht den üblichen kontinuierlichen Strahl aus, sondern viele extrem kurze Lichtblitze in rascher Folge (Bild auf S. 21). Solche ultrakurzen Pulse entstehen, wenn viele Strahlen verschiedener Wellenlänge kohärent, also mit einem fixen Abstand zwischen den Wellenbergen und -tälern der einzelnen Schwingungen, überlagert werden. In sehr vereinfachter Form ist dieses Phänomen auch im Alltag als Schwebung bekannt. Sie entsteht, wenn zwei Wellen sich überlagern, und wird zum Beispiel vom Klavierstimmer genutzt: Um Saiten für die gleiche Note in Einklang zu bringen, schlägt er sie zusammen an und ändert die mechanische Spannung der einen so lange, bis das charakteristische Lauter- und Leiserwerden der Schwebung verschwunden ist.

Wie ultrakurze Laserblitze Kämmen aus Licht bilden

In dem Laser, den Hall und Hänsch einsetzten, wurden sozusagen Tausende von Saiten gleichzeitig zum Klingen gebracht. Diese überlagerten sich dann zu einer periodischen Folge von extrem kurzen Lichtblitzen, die nur einige billiardstel Sekunden dauerten. Generell gilt: Je mehr Frequenzen ein solches Klanggewirr enthält, desto kürzer sind die Pulse. Die beiden Forscher verwendeten deshalb ein Lasermaterial, das sich in einem sehr breiten Energiebereich anregen ließ und Strahlen vieler Wellenlängen aussandte. Wegen der Resonanzbedingung wurden allerdings nur diejenigen verstärkt, welche stehende Wellen zwischen den Laserspiegeln bilden konnten. Dazu musste ihre Wellenlänge ein ganzzahliger Teiler des Spiegelabstands sein. Ihre Frequenz war demnach ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz, die einer Wellenlänge entsprach, bei der genau eine Welle zwischen die beiden Spiegel passte.

Das hatte zur Folge, dass das Frequenzspektrum des Pulses aus gleichmäßig angeordneten Linien bestand, deren Abstand gleich der Grundfrequenz war (die mittels einer Atomuhr exakt kontrolliert wurde). Damit ähnelte es einem Kamm, der mit seinen Zacken als optisches Lineal dienen konnte. Die Markierungen auf diesem Lineal waren dabei auf wenige Kilohertz genau bekannt.

Um die Frequenz eines anderen Lasers zu messen, mussten die Physiker nun nur noch die sehr viel niedrigere Schwebungsfrequenz (also die Differenz) zwischen seinem Licht und einem der Zacken des Frequenzkamms bestimmen.

Mit dieser Methode schufen Hall und Hänsch ein Übersetzungsgetriebe, das in seiner heutigen, weiterentwickelten Form sogar in einen Schuhkarton passt. Durch einfaches Justieren einiger Spiegel und Prismen kann man es zudem mühelos an die Frequenz der zu messenden Strahlung anpassen. Diejenige von sichtbarem Licht lässt sich so auf 15 Nachkommastellen genau messen, was unter anderem eine Grundvoraussetzung für künftige Generationen von Atomuhren ist und auch bei anderen technischen Anwendungen eine wichtige Rolle spielen wird – zum Beispiel der extrem schnellen Datenübertragung durch Glasfaserkabel.

Theodor Hänsch, der 1986 nach über einem Jahrzehnt aus den USA in die Heimat zurückkehrte und in München Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik wurde, wertet seinen Nobelpreis als Beweis dafür, dass man auch in Deutschland erstklassige Forschung

machen kann. Seinen Kollegen war ohnehin schon lange klar, dass »Ted« früher oder später den Nobelpreis bekommen würde. Auf fast jedem Forschungsgebiet, in dem Laser eine Rolle spielen, hatte er in den letzten dreißig Jahre Herausragendes geleistet – von der Laserspektroskopie (für die sein ehemaliger Chef Arthur Schawlow 1981 den Nobelpreis erhielt) über die Laserkühlung (die er in den 1970er Jahren theoretisch voraussagte) bis zur Bose-Einstein-Kondensation (die seinem früheren Schüler Carl Wieman 2001 den Nobelpreis einbrachte).

Als dann aber am 4. Oktober kurz vor Mittag der Anruf aus Stockholm kam, hatte Hänsch zum Feiern gar keine Zeit – wenig später musste er zum Flughafen aufbrechen, um eine seit Langem geplante Reise zu einer Geburtstagsfeier in Kalifornien anzutreten. Passenderweise war der Jubilar niemand Geringerer als der Mann, der Hänsch und seiner Zunft vor gut vierzig Jahren ihr wichtigstes Handwerkszeug bescherte: Charles H. Townes, der Erfinder des Lasers.

Oliver Morsch ist promovierter Physiker und arbeitet an der Universität Pisa über Bose-Einstein-Kondensate und Quantencomputer.

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Quadratisch, praktisch, gut: die Olefin-Metathese

Ein Partnertausch zwischen Kohlenstoffatomen blieb lange rätselhaft. Yves Chauvin entdeckte den Mechanismus; Richard R. Schrock und Robert H. Grubbs entwickelten wirksame Katalysatoren für die Reaktion. Diese Leistungen wurden nun mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Von Michael Groß

Mir sind ein paar merkwürdig verhexte Bauklötze in die Hände gefallen. Vielleicht kommen sie aus der Zauberwelt des Harry Potter, vielleicht auch aus der Erfinderwerkstatt von Ernö Rubik. Jeder hat die Form von zwei aneinander gefügten Würfeln. Wenn ich nun zwei dieser länglichen Klötze, zum Beispiel einen roten und einen gelben, so nebeneinander lege, dass sie von oben betrachtet ein Quadrat bilden, und dann

einen Moment nicht hinschaue, habe ich – schwups – auf einmal zwei Bauklötze, die jeweils aus einer roten und einer gelben Hälfte bestehen. Wie ist das möglich? Hexerei oder geniale Erfindung?

Vor ähnlichen Fragen standen organische Chemiker seit den 1950er Jahren, als sie immer öfter eine merkwürdige Beobachtung machten: Unter bestimmten Bedingungen gaben Moleküle, in denen zwei Kohlenstoffatome über eine so genannte Doppelbindung verknüpft waren, diese normalerweise sehr enge und

*Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.*

stabile Bindung ohne ersichtlichen Grund auf und führten mit anderen solchen Kohlenstoffpaaren einen Partnertausch aus. Nissim Calderon von der Firma Goodyear gab dem Reaktionstyp 1964 den Namen »Metathese« (griechisch für Platzwechsel). Er und andere erkannten schon früh, wie nützlich eine solche Tauschbörse ist, wenn man komplizierte organische Moleküle synthetisieren will. Schließlich erlaubt sie auf direkte und schonende – also umweltfreundliche – Weise das Lösen und Knüpfen von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen, was sonst meist nur auf komplizierten Umwegen gelingt.

Zwar können bei einem wahllosen Partnerwechsel unter Umständen viele verschiedene Produkte entstehen, die man womöglich gar nicht haben will. Doch dem lässt sich vorbeugen. Zum Beispiel kann man dafür sorgen, dass sich die zur Reaktion gebrachten Doppelbindungen jeweils am Ende einer Kohlenstoffkette befinden. Dann ist eines der Produkte das bei Raumtemperatur gasförmige Ethen ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$, früher Äthylen genannt), das sich mühelos aus der Reaktionsmischung entfernen lässt. Das chemische Gleichgewicht reagiert auf diesen Entzug mit dem »Bemühen«, mehr von dem Gas zu produzieren, so dass die eingesetzten Chemikalien vollständig in Ethen und die gewünschte Substanz umgewandelt werden. Befinden sich die beiden Doppelbindungen an den Enden derselben Kette, schließt diese sich zum Ring – ein Syntheseschritt, der bei vielen pharmakologisch relevanten Substanzen wichtig ist.

Doch da man in den 1950er und 1960er Jahren die Einzelheiten der Reaktion nicht verstand, konnte niemand vor-

hersagen, unter welchen Bedingungen sie besonders vorteilhaft einsetzbar wäre. Gewisse Metallverbindungen schienen die Reaktion zu beschleunigen, aber es war unklar, in welcher Form das Metall vorliegen muss, um eine solche Katalysatorrolle übernehmen zu können.

Im Jahr 1970 brachte Yves Chauvin, der am Institut Français du Pétrole in Rueil-Malmaison arbeitete, endlich Licht in dieses Dunkel. Er erinnerte sich an Arbeiten von Ernst Otto Fischer (Chemie-Nobelpreis 1973), der gezeigt hatte, dass Kohlenstoffatome, die nur zwei statt der üblichen vier Bindungen eingegangen waren, sich mit den beiden übrigen Elektronen an Metallatome oder -ionen anlagern können. Dabei bilden sie so genannte Metallcarbene. Wie der französische Forscher feststellte, eignen sich dieselben Metalle, die solche Verbindungen mit Kohlenstoff eingehen, auch als Katalysatoren für die Olefin-Metathese. Das brachte ihn auf eine Idee, die ihm nun – 35 Jahre später – den Chemie-Nobelpreis eintrug.

Die Quadratur des Reaktionskreislaufs

Nach Chauvin verhält sich das Metallcarben wie einer unserer magischen Bauklötze und nimmt bereitwillig an dem Bäumchen-wechsel-dich-Spiel teil. Wenn alles optimal läuft, ist es selbst am Ende wieder bei seinem alten Partner gelandet und hat nur die Partnerwechsel der anderen Teilnehmer vermittelt (siehe Kästen auf S. 24).

Die entscheidende Rolle im Molekülkreislauf von Chauvin spielt ein quadratisches Zwischenprodukt, ein so genanntes Metallo-Cyclobutan. Seine Entstehung kann man sich wie eine Figur

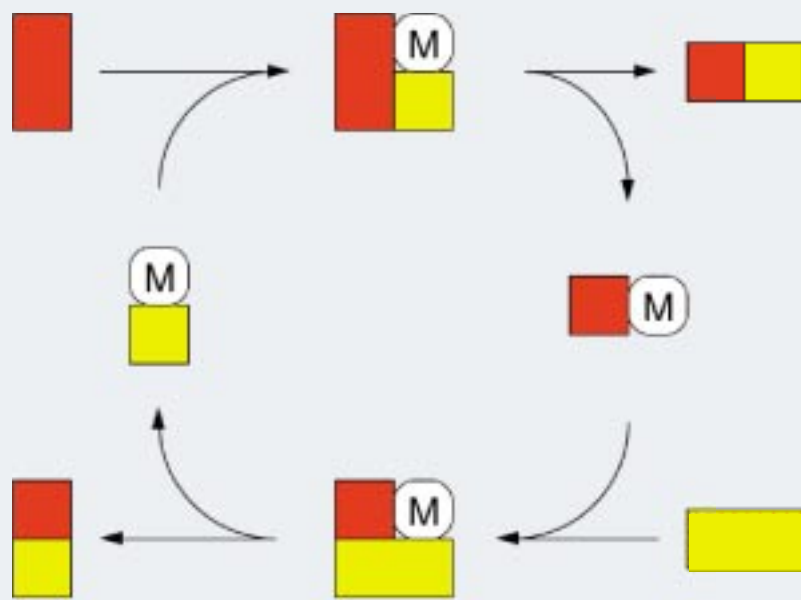
▲ Yves Chauvin (Mitte), ehemals Forschungsdirektor am Institut Français du Pétrole in Rueil-Malmaison, erhielt ebenso wie Robert H. Grubbs (links) vom California Institute of Technology in Pasadena und Richard R. Schrock vom Massachusetts Institute of Technology den Chemie-Nobelpreis für grundlegende Arbeiten zur Olefin-Metathese.

bei einem Volkstanz vorstellen. Anfangs halten sich die beiden Partner des Ausgangspaares an beiden Händen. Neben ihnen steht ein weiteres Paar. Darin hat das Katalysatormetall den Tauschpartner gefasst. Nun lassen die beiden Paare jeweils eine Hand los und reichen sich diese gegenseitig. Damit schließen sie sich zur quadratischen Vierergruppe zusammen. Gleich darauf aber lösen sie die andere Hand und bilden wieder zwei Paare. In denen sind nun die Partner getauscht.

In der Welt der Moleküle besteht das quadratische Zwischenprodukt – das Metallo-Cyclobutan – aus dem Metall und drei Kohlenstoffatomen. Diese unterscheiden sich durch ihre Bindungspartner an den verbliebenen zwei Armen: Es können einfache Wasserstoffatome oder höchst komplizierte Atomgruppierungen sein. Generell ist das Quadrat extrem reaktionsfreudig und daher kurzlebig – das war einer der Gründe, warum der genaue molekulare Ablauf erst zwei Jahrzehnte nach Entdeckung der Reaktion aufgeklärt wurde.

Chauvins Mechanismus hielt allen experimentellen Tests stand und ist heute allgemein akzeptiert. Mit ihm als Leitmodell konnten sich andere Forscher ►

Partnertausch beim Ringelreigen



MICHAEL GROSS

Der komplette Kreislauf einer Metathese

ist hier mit Bauklötzen illustriert. Als Katalysator fungiert der Quader M/gelb. Mit ihm steigen wir links in den Kreislauf ein. M/gelb bildet mit einem roten Klotz ein Quadrat, das in die Bestandteile rot/gelb und M/rot zerfällt. Natürlich könnten sich auch die Originalquadere zurückbilden, doch würde das zu keiner beobachtbaren Veränderung führen.

Rot/gelb ist eines unserer Reaktionsprodukte, während M/rot – quasi das Alter ego unseres Katalysators –

den Reaktionskreislauf fortführt. Es bildet mit einem gelben Klotz – mit einem roten ergäbe sich wiederum keine beobachtbare Veränderung – das unten abgebildete Quadrat. Dieses zerfällt in den ursprünglichen Katalysator M/gelb und ein weiteres Molekül des Reaktionsprodukts rot/gelb. Der Kreislauf ist damit geschlossen. Da unser M-Würfel unverändert aus diesem Zyklus hervorgegangen ist, kann er ihn beliebig oft durchlaufen. Ein Exemplar davon genügt also, um die Reaktion bis zum Gleichgewicht voranzutreiben.

▷ endlich an die systematische Entwicklung wirksamer Katalysatoren für die Olefin-Metathese machen. Zum Beispiel wussten sie jetzt, dass das Metallatom jeweils an eine der beteiligten Molekülhälften gebunden sein muss. Zudem waren nur solche Metalle geeignet, die Carbene bilden können. Trotz dieser Randbedingungen blieb aber noch viel Raum für Kreativität. Als entscheidend erwies sich nämlich, wie das Metallatom mit weiteren Molekülen »eingekleidet« ist.

Übergangsmetalle wie jene, die gewöhnlich für Katalysatzwecke benutzt werden, umgeben sich gern mit einer Hülle von molekularen Bindungspartnern, so genannten Liganden. Meist sind es vier bis sechs, die sich in geometrischen Figuren wie Tetra- oder Oktaeder um das Zentralatom gruppieren und mit

ihm einen »Komplex« bilden. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Feinabstimmung der chemischen Eigenschaften des Metalls. Das bedeutet auch, dass sie letztendlich über dessen Eignung als Katalysator mitentscheiden.

Auf die Beziehungen kommt es an

So musste Richard R. Schrock erkennen, dass die Carbenkomplexe von Tantal, die er seit Anfang der 1970er Jahre zunächst bei der Firma Dupont und später am Massachusetts Institute of Technology synthetisierte, sämtlich bei der Metathese-Reaktion versagten. Erst 1980 fand er schließlich die richtigen Liganden, die den Metallkomplex zum wirksamen Katalysator machten. Seine damalige Geduld wurde jetzt mit dem Nobelpreis belohnt.

In der Folgezeit ging aus diesem ersten Treffer eine ganze Familie ähnlicher Verbindungen hervor, die alle den Partnerswust rasant beschleunigen. Statt Tantal enthielten sie andere Metalle wie Molybdän oder Wolfram. Seither sind diese Katalysatoren vom Schrock-Typ aus den Forschungslabors nicht mehr wegzudenken. Obwohl die meisten organischen Chemiker sie dort bei Bedarf selbst herstellen, ist mindestens einer auch schon kommerziell erhältlich.

Schrocks Katalysatoren weisen aber einige Schwächen auf, die einer weiteren Ausbreitung vor allem im industriellen Bereich im Wege standen. So sind sie sehr empfindlich gegenüber Luftsauerstoff und Feuchtigkeit, weshalb sie das Arbeiten unter Schutzgas erfordern.

Robert H. Grubbs vom California Institute of Technology in Pasadena, der Dritte im Bund der diesjährigen Chemie-Nobelpreisträger, hatte sich schon in der Anfangszeit der Metathese-Forschung an der Suche nach dem Reaktionsmechanismus beteiligt und einen Vorschlag gemacht, der ein fünfeckiges Zwischenprodukt vorsah. Seine große Stunde kam allerdings erst zwei Jahrzehnte später, als er einen Carbenkomplex des Metalls Ruthenium als neuen Katalysator präsentieren konnte. Dieser war wesentlich robuster als die Komplexe vom Schrock-Typ und eröffnete daher auch ein viel breiteres Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten.

Der erste kommerziell gefertigte Grubbs-Katalysator kam 1995 auf den Markt. Seit 1999 gibt es ein verbessertes Modell. Dank dieser Reaktionsbeschleuniger hat die Olefin-Metathese heute ein sehr weites Anwendungsfeld erobert. Es reicht von der einfachen Polymerisierung kleiner Alkene bis hin zur Synthese hochkomplizierter Pharmawirkstoffe, vom Laborexperiment bis zum großindustriellen Prozess.

Die eingangs erwähnten magischen Bauklötze gibt es nicht wirklich, obwohl es mit moderner Mikroelektronik und ein paar Elektromagneten möglich sein sollte, sie herzustellen. Dagegen hat sich der analoge Vorgang in der Welt der Moleküle dank der Arbeiten der diesjährigen Nobelpreisträger zu einer der nützlichsten Reaktionen der organischen Chemie entwickelt.

Michael Groß ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

Spiele auf Leben und Tod

Die diesjährigen Wirtschafts-Nobelpreisträger, Robert J. Aumann und Thomas C. Schelling, haben das menschliche Verhalten im Spannungsfeld zwischen Konflikt und Kooperation mathematisch modelliert – als Züge in einem Spiel, das oftmals bitterer Ernst ist.

Von Christoph Pöppe

Mit dem Preis der Bank von Schweden für Wirtschaftswissenschaften im Gedenken an Alfred Nobel – so die offizielle Bezeichnung des »uneigentlichen« Nobelpreises – werden in diesem Jahr zwei große alte Männer hauptsächlich für ihr Jugendwerk ausgezeichnet. Robert J. Aumann, geboren 1930 in Frankfurt am Main, zum Mathematiker ausgebildet am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, seit 1968 Professor an der Hebräischen Universität in Jerusalem und häufiger Gast an zahlreichen Hochschulen der USA, verfasste seine grundlegenden Arbeiten Anfang der 1960er Jahre. Der sieben Jahre ältere

Thomas C. Schelling promovierte 1951 an der Harvard-Universität in Cambridge in Wirtschaftswissenschaften, wurde im selben Jahr Berater des US-Präsidenten und war von 1958 bis zu seiner Emeritierung 1990 Professor in Harvard. Sein einflussreiches Hauptwerk »The Strategy of Conflict« datiert von 1960.

Wie kommt es zu dieser selbst für Nobelpreisverhältnisse ungewöhnlich langen Wartezeit? Zwei Erklärungen bieten sich an.

Der Preis wurde für Arbeiten »zum besseren Verständnis von Konflikt und Kooperation mit Hilfe der Spieltheorie« verliehen. Vielleicht hält das Nobelkomitee die Spieltheorie nicht für einen bedeutenden Teil der Wirtschaftswissenschaften und vergibt Preise in dieser Richtung entsprechend sparsam – zuletzt 1994 an John Nash (den Helden des Films »A beautiful Mind«), John C. Harsanyi und Reinhard Selten (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 25). Demnach hätten Aumann und Schelling einfach warten müssen, bis die Spieltheorie wieder an der Reihe war.

Die zweite Erklärung stammt vom Preiskomitee selbst. Die Modelle der Preisträger »mussten sich erst an der Realität bewähren«, und nicht nur das: Sie waren ihrer Zeit so weit voraus, dass die theoretischen Hilfsmittel zu ihrer Verwendung erst noch geschaffen werden mussten, zum Teil von den Preisträgern selbst. In der Tat haben manche ihrer al- ►

► Der Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften ging an Thomas C. Schelling (links), ehemals Professor an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), und Robert J. Aumann von der Hebräischen Universität in Jerusalem. Beide glänzten durch bahnbrechende Arbeiten im Bereich der Spieltheorie.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

*Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.*

Der kalte Krieg motivierte Thomas C. Schelling zu seinen spieltheoretischen Untersuchungen. Damit konnte er Eskalationen durch Drohungen und Gegendrohungen erklären. Eine solche Zuspitzung der Lage ereignete sich 1961 beim Bau der Berliner Mauer, als sich am Checkpoint Charlie amerikanische und russische Panzer gegenüberstanden.

wenn man den Spielern unterstellt, dass sie stets bis zur äußersten Konsequenz denken und außer dem Streben nach möglichst hoher Punktzahl keine Gefühle kennen.

An dieser Stelle führte Aumann das Konzept vom unendlich oft iterierten Spiel ein. Da es kein letztes Spiel mehr gibt, entfällt auch die Erosion des Vertrauens durch das nahende Ende. Das kommt dem Verhalten echter Menschen deutlich näher als ein iteriertes Spiel mit vorher festgelegter Rundenzahl: Wer weiß schon so genau, wann sein letztes Spielstündlein geschlagen hat?

Aumann konnte formal-mathematisch beweisen, was seine Kollegen schon lange für empirisch belegt gehalten hatten und was in der Literatur als »folk theorem« zitiert wird: In jedem unendlich iterierten Spiel gibt es sehr viel mehr Gleichgewichte als in seiner beliebig langen endlichen Version. Als durchschnittliche Auszahlung pro Runde können alle Beträge vorkommen, die in einem gewissen Sinn zwischen den Einträgen in der Auszahlungsmatrix liegen. Die durchschnittliche Auszahlung sinkt für jeden Spieler nicht unter den Wert, den er bei sehr defensivem Spiel (von seinen Gegnern immer das Schlimmste vermuten und danach handeln) erreichen kann, und sie kann insbesondere beim unendlich iterierten Gefangenendilemma den paradiesischen Zustand ewiger Kooperation erreichen.

Indem man etwas Endliches entgegen der Realität als unendlich ansieht, kann also die Theorie zugleich einfacher und realitätsnäher werden. Dieses Rezept hat Aumann gleich noch einmal angewandt, und zwar auf einen Warenmarkt. Dass es in seinem Modell nicht nur unendlich viele Marktteilnehmer gibt, sondern ein Kontinuum (überabzählbar unendlich viele), erscheint zwar auf den ersten Blick befremdlich. Aber nur in diesem Fall hat das Handeln eines Einzelnen

▷ ten Ideen noch Jahrzehnte später durch eine nachträgliche theoretische Fundierung an Glanz zugelegt.

Für einen Spieltheoretiker ist ein Spiel nicht in erster Linie so etwas wie »Mensch ärgere dich nicht«, sondern erstens elementarer, damit es der Analyse zugänglich bleibt, und zweitens ernsthafter, denn es geht um echtes Geld oder auch Wertvolleres.

Die unendlichen Spiele des Robert Aumann

Einen ersten großen Schritt zu einer formalen Spieltheorie tat John Nash mit der Definition des Gleichgewichts, das inzwischen seinen Namen trägt (siehe Kasten rechts). Wie ein physikalisches System strebt auch ein Spiel einem Gleichgewicht zu, aber nur im Kopf der Spieler: Sind sie beim Nachdenken über ein möglichst geschicktes Verhalten, unter Einbeziehung des gegnerischen Verhaltens, bei einem solchen Zustand angekommen, kann kein Spieler sein eigenes Ergebnis (die »Auszahlung«) durch ein-

seitiges Abweichen von diesem Zustand verbessern.

Allerdings ist dieses Ergebnis deswegen noch lange nicht optimal, wie das bekannte Gefangenendilemma in drastischer Weise zeigt. Da die Spieler keine Gelegenheit haben, Vertrauen zu entwickeln und sich seiner würdig zu erweisen, ergibt sich als einziges Nash-Gleichgewicht die beiderseits von Misstrauen geprägte Nichtkooperation. Realitätsnäher ist das ebenfalls wohlbekannte iterierte Gefangenendilemma: Die Spieler spielen immer wieder dasselbe Spiel miteinander. In dieser Situation kann Kooperation sich langfristig lohnen, weil die Gegenseite sie – in ihrem eigenen Interesse – erwidert.

Am Ende der Spielserie ist es aber wieder zweckmäßig, nicht zu kooperieren – man muss ja keine Vergeltung mehr fürchten. Belohnt wird, wer zuerst die Kooperation einstellt, und nach einigem Nachdenken kommen beide Seiten zu dem Schluss, mit dem Kooperieren gar nicht erst anzufangen – jedenfalls,

keinen Einfluss auf das Verhalten des Gesamtmarktes (was für Märkte mit endlich oder abzählbar vielen Teilnehmern nur angenähert gilt).

Das wiederum macht die Theorie so handhabbar, dass Aumann die Identität zweier zentraler Konzepte beweisen konnte: Die Verallgemeinerung des Nash-Gleichgewichts für ein Kontinuum von Handelnden ist nicht nur eindeutig bestimmt, sondern fällt mit dem Wettbewerbsgleichgewicht (*competitive equilibrium*) aus der klassischen Markttheorie zusammen. Die Mathematik des überabzählbar Unendlichen, die Maß- und Integrationstheorie, musste Aumann eigens für diese Zwecke ein Stück weiterentwickeln.

Im Vergleich zu den sehr tief gehenden theoretischen Arbeiten Aumanns wirken die Untersuchungen seines Mitpreisträgers wie Fallstudien an einem

ziemlich konkreten Beispiel. Thomas Schelling studierte das spannendste und gefährlichste Spiel seiner Zeit: den Rüstungswettlauf.

Thomas Schelling und die Theorie des Wettrüstens

Die formalisierte Version des Spiels heißt in der Literatur »Chicken« – nach dem Zeitvertreib, mit dem angeblich die Jugendlichen in der amerikanischen Kleinstadt den öden Sonntagnachmittag auflockern: Auf der Main Street rasen zwei Autos mit Vollgas aufeinander zu. Wer zuerst ausweicht, gilt als Feigling (*chicken*) und hat verloren. Oder zwei dynamitbeladene Lastwagen begegnen sich auf einer Straße, die nur für einen breit genug ist (siehe Kasten auf S. 28).

Aus dieser völlig symmetrischen Vorgabe ist nicht zu entnehmen, wer von ▷

Nash-Gleichgewicht

Ein Spiel im Sinne der Spieltheorie ist eine sehr formelle Angelegenheit. Die Teilnehmer haben gewisse Handlungsmöglichkeiten zur Auswahl. Aus diesen wählen sie gleichzeitig jeweils eine aus, ohne sich verständigen oder das Verhalten ihrer Mitspieler beobachten zu können. In einer Tabelle (der »Auszahlungsmatrix«) ist für jede mögliche Kombination von Handlungen aufgezeichnet, wie viel jeder Spieler gewinnt oder verliert; und mit dieser Auszahlung ist das Spiel auch schon zu Ende.

In den wenigen Zahlen einer Auszahlungsmatrix kann ein ungeheures Konfliktpotenzial stecken. Das bekannteste Beispiel ist das berühmt-berüchtigte Gefangenendilemma:

A \ B		
	kooperieren	verweigern
kooperieren	(2, 2)	(0, 3)
verweigern	(3, 0)	(1, 1)

Jeder Eintrag der Matrix enthält die Auszahlung für den ersten und den zweiten Spieler, in dieser Reihenfolge. Zum Beispiel besagt der rechte obere Eintrag: Wenn A kooperiert und B nicht, erhält A null Punkte und B drei.

Kooperieren ist gut (2 Punkte für jeden), Verweigerung ist besser (3 Punkte), wenn der andere kooperiert. Aber einerlei was der Partner tut: Nicht kooperieren ist besser als kooperieren. Also entscheiden sich beide Spieler für »verweigern« und lassen sich damit die Vorteile der Kooperation entgehen.

Ein Nash-Gleichgewicht ist ein Satz von Strategien (für jeden Spieler eine) mit der Eigenschaft, dass kein Spieler durch einseitiges Abweichen von seiner Strategie einen Vorteil erzielen kann. Eine Strategie ist der Vorsatz eines Spielers, entweder eine bestimmte unter den gebotenen Möglichkeiten zu wählen (reine Strategie) oder diese Wahl vom Ergebnis eines Zufallsexperiments (mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten) abhängig zu machen (gemischte Strategie).

John Nash hat bewiesen, dass es bei Spielen, die durch eine Auszahlungsmatrix nach obigem Muster definiert sind, stets (mindestens) ein Nash-Gleichgewicht gibt. Im Fall des Gefangenendilemmas ist das einzige Nash-Gleichgewicht der unbefriedigende Zustand (verweigern, verweigern).

Wissen aus erster Hand



Auch im Handel erhältlich!

ABENTEUER ARCHÄOLOGIE berichtet in packenden Beiträgen, wie Archäologen, Naturwissenschaftler und Historiker die Rätsel vergangener Welten und Kulturen entschlüsseln:

- ▶ kompetent
- ▶ authentisch
- ▶ verständlich

Nähere Informationen und eine Bestellmöglichkeit finden Sie unter

www.abenteuer-archaeologie.de

Wer zuerst ausweicht, hat verloren

Zwei Länder **A** und **B** erheben Anspruch auf eine Provinz (sagen wir Kaschmir). Ein Land, das seine Truppen in Stellung bringt, kann die Provinz kampflos erobern, es sei denn, das andere Land hätte ebenfalls mobilgemacht. In diesem Fall gibt es Krieg. Dieses Szenario wird durch das Spiel »Chicken« (»Feigling«) modelliert, mit der folgenden Auszahlungsmatrix:

A \ B	B	
	mobilmachen	nicht mobilmachen
mobilmachen	(0, 0)	(a, c)
nicht mobilmachen	(c, a)	(b, b)

Dabei gilt $a > b > c > 0$: Am schönsten (a) ist es, die Provinz zu besitzen; die Fortdauer des Status quo ist nur die zweitbeste Lösung (b); aber für beide Seiten ist Krieg (0) schlimmer als der Verlust der umstrittenen Provinz (c).

Dieses Spiel hat drei Nash-Gleichgewichte. Davon bestehen zwei, nämlich (a, c) und (c, a), aus reinen Strategien: Einer erobert, und der andere gibt klein bei. Das dritte ist ein gemischtes Gleichgewicht: Jede Partei würfelt und entscheidet sich mit Wahrscheinlichkeit p für eine Mobilmachung. Dabei hat p für beide den gleichen Wert, da die Situation vollkommen symmetrisch ist. Also ist die erwartete Auszahlung bei Mobilmachung $(1-p)a$ und bei Nichtmobilmachung $pc + (1-p)b$. Gleichgewicht besteht dann, wenn diese beiden Werte gleich sind, denn dann hat keine Seite etwas davon, einseitig den Wert von p zu ändern. Daraus ergibt sich eine Gleichung für p mit der Lösung $p = (a-b)/(a-b+c)$.

Eine Friedenspolitik muss zum Ziel haben, p möglichst klein zu machen, denn p^2 ist die Wahrscheinlichkeit für Krieg. Das kann man erreichen, indem man $a-b$ verkleinert, das heißt das Erobern im Vergleich zum Friedenszustand möglichst unattraktiv macht, oder – wirksamer – indem man c vergrößert, sprich dem Verlierer sein zu erwartendes Schicksal versüßt.

Das »Gleichgewicht des Schreckens« (b, b) ist in diesem Modell kein Gleichgewicht! Das geschieht erst dadurch, dass beide Länder zusätzlich die Spieloption erhalten, eine Art Reaktionsautomatik (zum Beispiel die viel diskutierte »Zweitschlagskapazität« aus der Zeit des Wettrüstens) einzurichten oder auch nicht. Wenn Land A die Möglichkeit hat, sich darauf festzulegen, genau dann mobilzumachen, wenn auch Land B mobilmacht, dann wird A von dieser Möglichkeit Gebrauch machen und B nicht mobilmachen; das jedenfalls ist ein Nash-Gleichgewicht.

▷ beiden klein begeben soll. Aber die kleinste Asymmetrie, selbst wenn sie nur in den Köpfen der Beteiligten besteht, lässt die Situation kippen. Schon wenn Spieler A sein Leben mehr liebt als Spieler B – und sei es auch nur vermeintlich – und B das erfährt, hat A verloren, denn B wird dann die draufgängerische Strategie wählen. Es ist also hilfreich, den anderen über die eigenen Motive zu täuschen. Diese psychologischen Feinheiten kann die Spieltheorie nicht erfassen, ebenso wenig wie man »durch eine rein formale Herleitung beweisen kann, dass ein bestimmter Witz witzig sein muss«, so ein berühmt gewordenes Zitat aus Schellings »Strategy of Conflict«.

Aber von den seltsamen Denk- und Verhaltensweisen des Wettrüstens liegt, wie Schelling demonstrierte, ein erstaunlich hoher Anteil innerhalb der Reichweite der Spieltheorie. So kann sie erklären, warum es für einen Spieler unter Umständen vorteilhaft ist, sich die eigenen Möglichkeiten unwiderruflich zu beschneiden. Der General, der hinter sich die Brücken sprengt, oder der Wahnsinnige, der beim Chicken-Spiel sein Lenkrad in der Geradausstellung festklemmt, macht seinem Gegenspieler klar, dass er gar nicht mehr klein begeben kann, lässt diesem daher das Nachgeben als vorteilhafteste Option erscheinen und hat damit gewonnen. Es sei

denn, der Gegner wäre ebenfalls wahnsinnig.

Ein weiteres Ergebnis von Schellings Analyse lautet: Vorteilhafter als die Drohung mit der automatischen Vergeltung ist oft die, sich im Konfliktfall »die Kontrolle entgleiten zu lassen«. Drohungen sind umso glaubwürdiger, je weniger sie den Drohenden kosten. Es ist daher eine vorteilhafte Strategie, langsam die Wahrscheinlichkeit eines Kriegs ansteigen zu lassen. Da die andere Seite auf jeder Stufe der Eskalation nachgeben kann, bleiben echte Kriege selten – eine Situation, welche die meisten Kinder perfekt verstehen, wie Schelling bemerkte.

Warum Abrüstungsverhandlungen nur zäh vorankommen

In unlösbar scheinenden Situationen ist es bisweilen hilfreich, das Problem in kleinere Teilprobleme aufzulösen, das heißt aus dem großen Spiel ein iteriertes Spiel mit kleinerem Einsatz pro Runde zu machen. So kann das gegenseitige Misstrauen, das im Gefangenendilemma die Gemeinsamkeit untergräbt, dem Aufbau von Kooperation weichen, wie er im iterierten Gefangenendilemma vorkommt. Das erklärt, warum Abrüstungsverhandlungen unweigerlich langsam vorankommen.

Ob und wenn ja, wie die Militärstrategen Schellings Erkenntnisse genutzt haben, bleibt auch heute noch deren Geheimnis. Ein gewisses Indiz immerhin ist, dass die Nationale Akademie der Wissenschaften der USA Schelling für seine »Verhaltensforschung mit Relevanz für die Verhinderung eines Atomkriegs« eine Auszeichnung verlieh.

Das jüngste größere Werk des Meisters bezieht sich auf Spiele, deren Beteiligte die zwei (oder mehr) Seelen in der Brust ein und desselben Menschen sind. In der Tat: Dass alle Beteiligten das Beste (für sich selbst) wollen, aber das langfristige Wohlergehen dem kurzfristigen Vergnügen opfern, ist typisch nicht nur für das Gefangenendilemma, sondern auch für die guten Vorsätze jedes Menschen: nicht mehr rauchen, mehr Sport treiben, nicht so viel essen und so weiter. So ist es nur konsequent, dass Schelling von 1984 bis 1990 Direktor des Instituts für die Erforschung der Raucherhaltens an der Harvard-Universität war.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Sex im All

In der Schwerelosigkeit fällt nicht alles leicht.

Bemannte Raumfahrt ist bekanntlich bei Politikern und Sciencefiction-Fans beliebter als unter Astrophysikern. Die hätten das viele Geld lieber für unbemannte Raumsonden oder für die fällige Reparatur des Hubble-Weltraumteleskops. Aber da jetzt sogar die Chinesen zum Mond fliegen wollen, werden sich die reichen Länder gewiss nicht lumpen lassen und ihre bisher etwas lustlos geplanten bemannten Mond- und Marsmissionen forcieren.

Apropos lustlos. Weltraummediziner erforschen zwar längst Verdauungsstörungen, Muskelschwund und Kreislaufschwäche infolge längerer Aufenthalte im All, aber dass Astronauten sexuelle Wesen sind, war bisher kein Thema. Der typische Raumfahrer trägt sekundäre Geschlechtsmerkmale wie Bartwuchs und Geheimratsecken, sieht nur in Ausnahmefällen aus wie eine Frau – sonst hieße es ja weibte Raumfahrt –, und sämtliche Besatzungsmitglieder sind absolut asexuell.

Dass diese Fiktion im Lauf der dreißig Monate, die man zum Mars und zurück braucht, ziemlich sicher zusammenbrechen wird, ist jetzt doch einigen Fachleuten aufgefallen. Wie die britische Zeitschrift »New Scientist« kürzlich meldete, warnt die National Academy of Sciences der USA in einem Bericht an die Welt-raumbehörde Nasa vor erotischen Verwicklungen im All.

Einer der Autoren, der Arzt und Anthropologe Lawrence Palinkas von der University of Southern California in Los Angeles, konnte in antarktischen Forschungsstationen Erfahrungen sammeln. Aus ihnen schließt er, dass sich auch in einem Marsschiff recht stabile sexuelle Bindungen etablieren werden. Dabei kommt es aber mit einiger Wahrscheinlichkeit zu Untreue, Eifersucht, Streit und Trennung; darunter könnte das soziale Leben an Bord zusammenbrechen. Palinkas empfiehlt darum ein spezielles Training der Astronauten, eine Art vorbeugende Paarberatung mit Einzelaussprache und Gruppentherapie.

Die Sexualpsychologin Carol Rinkleib Ellison aus Oakland (Kalifornien) teilt zwar die Sorge, sieht im interplanetaren Liebesleben aber auch Vorteile. Der Alltag während einer monatelangen Mission drohe zur öden Routine zu geraten, die lange Reise durch den lebensfeindlichen Weltraum mache Angst; da könnten sexuelle Aktivitäten oder zumindest Masturbation Trost und Abwechslung bringen.

Ellison rät der Nasa daher, sich mehr um die praktische Seite von Weltraumsex zu kümmern. Raumfahrer stehen unter ständiger gegenseitiger Beobachtung und werden obendrein von der Erde aus kontrolliert. Es fällt nicht jedem leicht, sozusagen öffentlich intim zu werden, während Monitore alle Winkel ausspionieren und Sensoren Atemfrequenz, Puls und Körpertemperatur messen.

Ein weiteres Hindernis vermutet die Sexualforscherin im Fehlen der gewohnten Gravitation: »Wie hat man Sex unter Schwerelosigkeit?«, fragt sie besorgt. Offenbar kennt sie den Film »Solaris« von Andrej Tarkowski nicht. Da zieht sich das Liebespaar in die Bibliothek einer Raumstation zurück, während aus nicht näher erklärten Gründen für einige Zeit die Schwerkraft abgeschaltet wird. Zwischen langsam flatternden Folianten schweben Mann und Frau umschlungen dahin, während Orgelmusik von Bach ertönt.



Michael Springer

Vielleicht sollte man sich um die erotische Seite einer hoffentlich nicht nur »bemannten« Raumfahrt keine allzu großen Sorgen machen. Das dicke Ende kommt erst danach: wenn die Marsfahrer nach fast drei Jahren ihre nun wieder bleischweren Leiber ins irdische Bett hieven und sich fragen, wie man damit Sex haben kann.

WICHTIGE ONLINE- ADRESSEN

>> Dipl.-Ing. Rünald Meyer VDI

Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

>> DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor

Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

>> Fu.G. Elektronik GmbH

Hochgenaue Gleichspannungsversorgungen
Netzgeräte für Nieder- und Hochspannung
für alle Anwendungen in Forschung und Technik
www.fug-elektronik.de

>> Foto-Scout-Zuse

Die lernende Bildsuchmaschine der
besonderen Art zum Sichten, Sortieren und
Wiederfinden von Fotos auf Ihrem PC
www.foto-scout-zuse.com

>> Kernmechanik – die neue Quantenphysik Kernspin + Dipolmomente www.kernmechanik.de

>> Patentanwälte Charrier Rapp & Liebau

Beratung und Vertretung in Patent-,
Muster- und Markenangelegenheiten,
Lizenzen und Patentrecherchen
www.charrier.de

>> Tsunami Warnung

Neu: SMS-Warmmeldung sofort auf das
Handy, wenn eine Riesenwelle droht!
www.tsunami-alarm-system.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de