

# Nobelpreise 1999

## Nobelpreis in Physik

Die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften hat den Nobelpreis in Physik für das Jahr 1999 gemeinsam verliehen an Professor Gerardus 't Hooft, Utrecht Universität, Utrecht, Niederlande, und Professor emeritus Martinus J.G. Veltman, Bilthoven, Niederlande.

Die beiden Forscher erhalten den Nobelpreis dafür, daß sie die Theorie der Elementarteilchenphysik auf festeren mathematischen Grund gestellt haben. Sie haben im speziellen gezeigt, wie die Theorie zu genauen Berechnungen physikalischer Größen angewendet werden kann. Experimente an den Teilchenbeschleunigerlaboratorien in Europa und den USA haben kürzlich viele der berechneten Ergebnisse bestätigt.

### Entscheidung der Akademie der Wissenschaften:

*"für ihre entscheidenden, die Quantenstruktur betreffenden Beiträge zur Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung in der Physik".*

### Die Theorie der Elementarteilchenphysik auf festerem mathematischen Grund

Die alltäglichen Gegenstände in unserer Umgebung sind alle aus Atomen, die aus Elektronen und Atomkernen bestehen, aufgebaut. Innerhalb der Atomkerne befinden sich Protonen und Neutronen, die wiederum aus Quarks aufgebaut sind. Um die Materie auf diesem innersten Niveau zu studieren, benötigt man große Beschleuniger. Diese wurden erst in den 50er Jahren gebaut und das bedeutete die Geburt der modernen Elementarteilchenphysik. Zum ersten Mal konnten die Forscher energiereiche atomare Partikel kontrollierbar zusammenstoßen lassen. Dadurch konnte man sowohl das Entstehen neuer Teilchen als auch die Beschaffenheit der Kräfte, die zwischen ihnen wirken, studieren.

Ungefähr in der Mitte der 50er Jahre wurde auch die erste Fassung einer modernen Theorie formuliert, die nach vielen Jahren der Bearbeitung nun zu dem Standardmodell in der Elementarteilchenphysik Anlaß gegeben hat. Gemäß diesem Modell werden alle Elementarteilchen in drei Familien von Quarks und Leptonen eingeteilt, welche mit Hilfe von einer Anzahl von Austauschteilchen für die starken und elektroschwachen Kräfte wechselwirken. (Siehe Abb. 1) Das theoretische Fundament des Standardmodells war aus mathematischem Gesichtspunkt von Anfang an unvollständig und es war vor allem unklar, ob die Theorie überhaupt zu detaillierten Berechnungen physikalischer Größen verwendet werden könnte. In diesem Jahr werden Gerardus 't Hooft und Martinus J.G. Veltman dafür mit dem Nobelpreis ausgezeichnet, daß sie diese Theorie auf festeren mathematischen Grund gestellt haben. Dadurch haben die Forscher nun auch eine gut funktionierende "theoretische Maschinerie", die unter anderem zur Vorhersage von Eigenschaften neuer Teilchen verwendet werden kann.

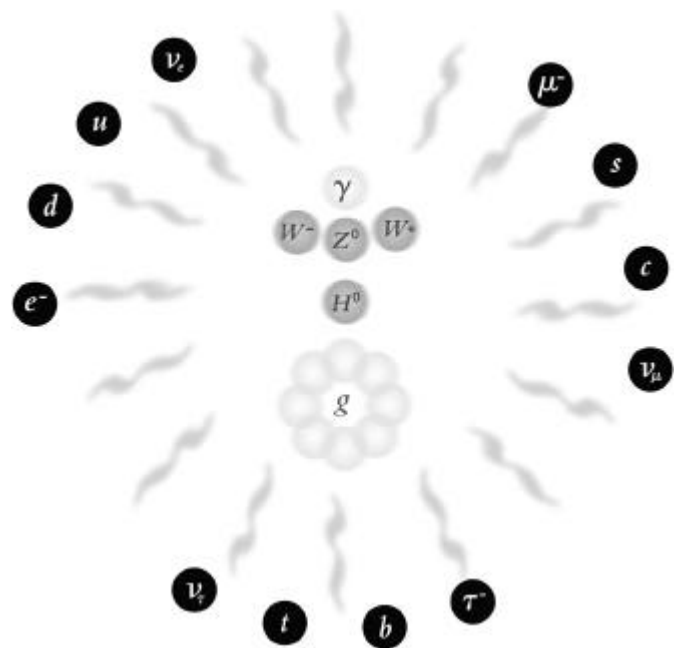


Abb. 1: Die fundamentalen Teilchen der Materie sind sechs Leptonen und sechs Quarks. In dem Standardmodell der Teilchenphysik werden die Kräfte zwischen diesen durch Quantenfeldtheorien beschrieben, die alle vom Typ nicht-abelscher Eichtheorien sind. Die elektroschwache Kraft wird von vier Austauschteilchen übertragen. Das sind die masselosen Photonen (gamma) und die drei schweren Teilchen  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$ . Die starke Kraft wird von acht masselosen sogenannten Gluonen  $g$  übertragen. Die Theorie sagt voraus, daß es über diese zwölf Austauschteilchen hinaus ein sehr schweres Teilchen, das Higgs-Teilchen  $H^0$ , gibt, dessen Feld alle diese vielen Teilchen verursacht.

### Neuer Name für alte Theorie

Die heute in dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik verwendeten modernen Theorien, welche die Wechselwirkung zwischen den Teilchen beschreiben, sind alle sogenannte Eichtheorien. Der Name bezieht sich auf eine spezielle Eigenschaft dieser Theorien, die Eichsymmetrie, die von vielen Forschern als eine der fundamentalsten Eigenschaften der Physik angesehen wird. Aber schon um 1860 formulierte der Schotte James Clerk Maxwell eine Theorie für den Elektromagnetismus, die in heutiger, moderner Terminologie eine Eichtheorie ist. Seine Theorie, die auch heute noch Gültigkeit besitzt, vereinte Elektrizität mit Magnetismus und sagte unter anderem die Existenz von Radiowellen voraus.

Man kann den Begriff Eichsymmetrie auf folgende Art anschaulich machen: Elektrische und magnetische Felder können mit Hilfe von Potentialfunktionen dargestellt werden. Diese Funktionen können nach einem gewissen Schema ausgetauscht (eichtransformiert) werden ohne daß sich die Felder deswegen ändern. Die allereinfachste Transformation ist die Addition einer Konstanten zu den elektrischen Potentialen. Physikalisch verdeutlicht dieses die wohlbekannt Tatsache, daß das elektrische Potential von einem willkürlichen Nullpunkt aus gerechnet werden kann; nur Änderungen im Potential spielen eine Rolle. Deshalb kann ein Eichhörnchen auf einer Hochspannungsleitung entlang laufen ohne Schaden zu

nach: Pressemitteilungen der Nobelstiftung

nehmen. Die Möglichkeit einer derartigen Verschiebung des Nullpunkts wird von den Physikern als eine Symmetrie in der Theorie, eine Eichsymmetrie, aufgefaßt.

Es zeigt sich, daß es bei der Ausführung von zwei Eichtransformationen nacheinander keine Rolle spielt, in welcher Reihenfolge man vorgeht. Deshalb pflegt man den Elektromagnetismus als eine abelsche Eichtheorie zu bezeichnen nach dem norwegischen Mathematiker Niels Henrik Abel, der von 1802 bis 1829 lebte. (Ein einfaches Beispiel für Transformationen, die abelsch sind, sind Drehungen in der Ebene. Versuchen Sie selbst mit einem Bleistift! Siehe Abb. 2).

Abb. 2a: Ein Beispiel für eine Gruppe abelscher Transformationen sind die Drehungen in einer Ebene. (2 Dimensionen)

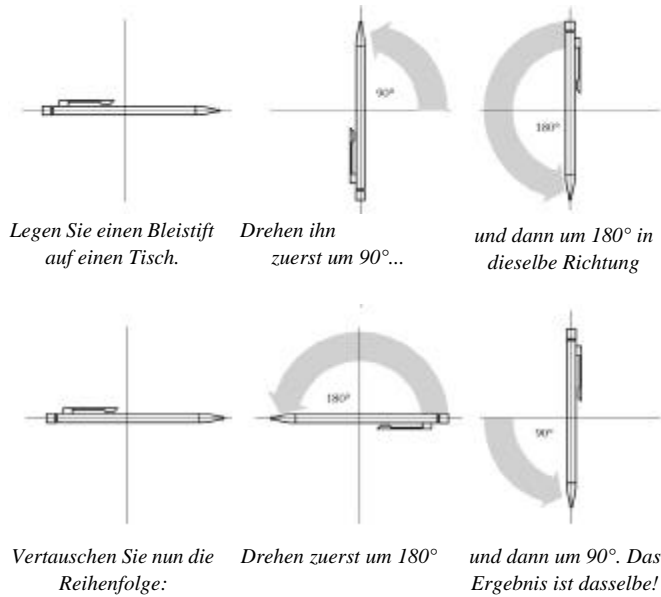
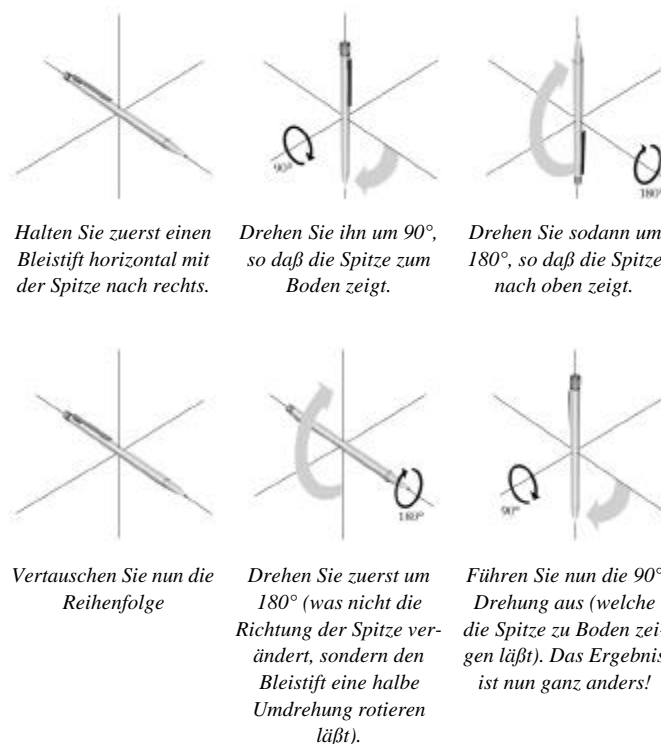


Abb. 2b: Ein Beispiel für eine Gruppe nicht-abelscher Transformationen sind Drehungen im dreidimensionalen Raum.



## Die Quantenmechanik verursacht Probleme

Sofort nachdem die Quantenmechanik um 1925 formuliert worden war, wurde der Versuch unternommen, die Wellenfunktionen der Quantenmechanik und das elektromagnetische Feld in einer Quantenfeldtheorie zu vereinigen. Aber da stieß man auf Probleme! Die neue Quantenelektrodynamik blieb kompliziert und wenn man Berechnungen durchführen wollte, ergaben sich oft sinnlose Resultate. Ein Grund hierfür war, daß die Quantentheorie vorhersagt, daß das elektromagnetische Feld in der Nähe von z. B. einem Elektron oder Proton spontan die Entstehung von Mengen kurzlebiger Paare von Teilchen und Antiteilchen, von virtuellen Teilchen (Siehe Abb. 3), bewirken kann. Ein System mit nur einem Elektron wurde plötzlich ein Mehrteilchenproblem.

Die Probleme wurden von Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger und Richard P. Feynman (die sich für ihre Arbeiten den Nobelpreis des Jahres 1965 teilen konnten) gelöst. Die von diesen drei Forschern entwickelte Methode wird Renormierung genannt und sie besagt, einfach ausgedrückt, daß man die einzelnen Teilchen "aus etwas Abstand" betrachtet. Dadurch muß man nicht die virtuellen Teilchen einzeln berücksichtigen, sondern kann "die Wolke" aus virtuellen Teilchen das zentrale, ursprüngliche Teilchen einhüllen lassen. Dieses erhält so unter anderem eine neue Ladung und eine neue Masse. In moderner Terminologie kann man sagen, daß Tomonaga, Schwinger und Feynman eine abelsche Eichtheorie renormiert haben.

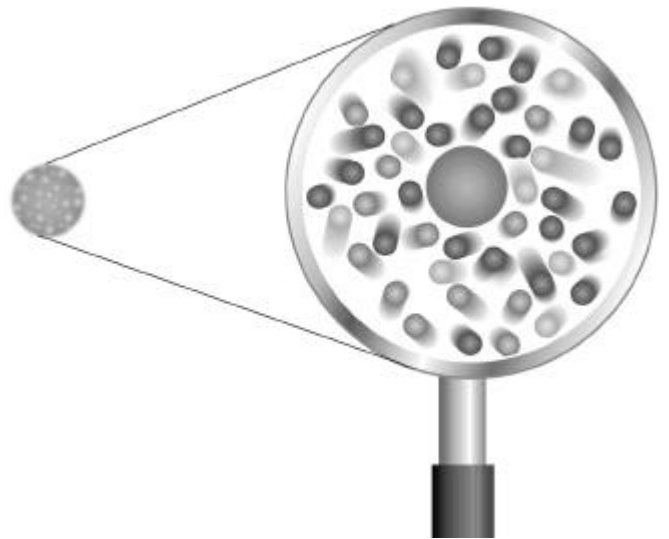


Abb.3: Gemäß der Quantenfeldtheorie besteht ein richtiges "physikalisches" Teilchen aus einem "nackten" Zentralteilchen "angezogen" mit einer Wolke von vielen kurzlebigen, sogenannten virtuellen Teilchen.

Die Quantenelektrodynamik ist in letzter Zeit mit größerer Sorgfalt als irgendeine andere physikalische Theorie geprüft worden. So ist es z.B. Hans Dehmelt (Nobelpreis in Physik 1989) gelungen, in einer Ionenfalle das magnetische Moment des Elektrons mit einer Genauigkeit von 12 Stellen zu messen. Die ersten 10 Stellen stimmen mit dem berechneten Ergebnis überein.

## Vereinigte elektromagnetische und schwache Wechselwirkung

Die Entdeckung und das Studium der Radioaktivität und die spätere Entwicklung der Kernphysik gab in der ersten Hälfte

des 20sten Jahrhunderts Anlaß zu Begriffen wie *starke und schwache Wechselwirkung*. Vereinfacht ausgedrückt hält die starke die Atomkerne zusammen, während die schwache gewisse Atomkerne radioaktiv zerfallen läßt. Schon in den 30er Jahren wurde eine erste *Quantenfeldtheorie für die schwache Wechselwirkung* formuliert. Diese Theorie litt unter Problemen, die noch schlimmer waren als diejenigen, die die Quantenelektrodynamik hatte und nicht einmal die von Tomonaga, Schwinger und Feynman entwickelte Renormierungsmethode konnte die Probleme lösen.

In der Mitte der 50er Jahre jedoch fanden einige Forscher ein erstes Beispiel für eine Quantenfeldtheorie mit neuen Eigenschaften, *eine nicht-abelsche Eichtheorie*. Zum Unterschied von der abelschen Variante, in welcher Eichtransformationen unabhängig von der Reihenfolge ausgeführt werden können, hängen die Ergebnisse in der nicht-abelschen von der Reihenfolge ab. Das gibt der Theorie eine kompliziertere mathematische Struktur, aber eröffnet auch neue Möglichkeiten. (Ein einfaches Beispiel für Transformationen, die nicht-abelsch sind, sind Drehungen im Raum. Versuchen Sie selbst mit einem Bleistift! Siehe Abb. 2b.)

Die neuen Möglichkeiten der Theorie wurden erst in den 60er Jahren voll genutzt, als eine Reihe von Forschern bei der Entwicklung einer nicht-abelschen Eichtheorie mitwirkten, welche die elektromagnetische mit der schwachen Wechselwirkung zu einer *elektroschwachen Wechselwirkung* vereinigt (Nobelpreis 1979 für Sheldon L. Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg). Diese Quantenfeldtheorie sagte unter anderem die neuen Teilchen W und Z voraus, die 1983 am europäischen Beschleunigerlabor CERN, Genf (Nobelpreis 1984 für Carlo Rubbia und Simon van der Meer) nachgewiesen wurden.

### Die Geschichte wiederholt sich

Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung, die in den 60er Jahren entwickelt wurde, war sicherlich ein großer Schritt vorwärts, aber die Wissenschaftler hatten es zuerst schwer, sie zu akzeptieren. Als man die Theorie zur Berechnung genauere Eigenschaften der neuen Teilchen W und Z (und vieler anderer physikalischer Größen) anwenden wollte, lieferte sie sinnlose Ergebnisse. Die Situation war der in den 30er Jahren ähnlich, bevor es Tomonaga, Schwinger und Feynman gelang, die Quantenelektrodynamik zu renormieren. Viele Forscher waren pessimistisch über die Möglichkeiten, mit einer derartigen Theorie weiterzukommen.

Einer, der nicht die Hoffnung aufgegeben hatte, nicht-abelsche Eichtheorien renormieren zu können, war Martinus J.G. Veltman. Er war zu Ende der 60er Jahre neu ernannter Professor an der Universität in Utrecht. Veltman hatte das Computerprogramm *Schoonship* entwickelt, welches symbolisch algebraische Vereinfachungen der komplizierten Ausdrücke durchführte, die sich in allen Quantenfeldtheorien bei quantitativen Berechnungen ergeben. 20 Jahre früher hatte zwar Feynman das Berechnungsproblem systematisiert und die sogenannten *Feynmandiagramme*, die schnell in der Welt der Forschung angenommen wurden, eingeführt; aber damals gab es keine Computer. Veltman glaubte felsenfest an die Möglichkeit, einen Weg zu finden, um die Renormierung auszuführen, und

sein Computerprogramm war ein Meilenstein in der umfangreichen Arbeit, verschiedene Ideen auszutesten.

Im Frühjahr 1969 bekam Veltman einen jungen, 22 Jahre alten Schüler, Gerardus 't Hooft, der Hochenergiephysik studieren wollte. Nachdem er eine erste kleine Abhandlung geschrieben hatte wurde 't Hooft im Herbst des gleichen Jahres als Doktorand angenommen. Die Aufgabe war, bei der Suche nach einer Methode zur Renormierung nicht-abelscher Eichtheorien mitzuarbeiten. Er war überaus erfolgreich und veröffentlichte schon 1971 zwei Arbeiten, die einen wichtigen Durchbruch im Forschungsprogramm darstellten.

Mit Hilfe von Veltmans Computerprogramm wurde nun 't Hoofts Teilergebnis bestätigt und gemeinsam arbeiteten sie eine funktionierende Berechnungsmethode im Detail aus. Somit war die nicht-abelsche Eichtheorie der elektroschwachen Wechselwirkung eine funktionierende theoretische Maschine geworden und man konnte, genau wie vor 20 Jahren, mit genauen Berechnungen beginnen.

### Die Aussagen der Theorie werden bestätigt

Wie schon oben dargestellt, sagte die elektroschwache Theorie schon von Anfang an die Existenz der neuen Teilchen W und Z voraus. Aber erst durch 't Hoofts und Veltmans Arbeiten konnte man beginnen, physikalische Größen, bei denen die Eigenschaften von W und Z eine Rolle spielen, genauer zu berechnen. In dem Beschleuniger LEP bei CERN ist es in letzter Zeit gelungen, große Mengen von W und Z unter kontrollierbaren Verhältnissen zu erzeugen. Vergleiche zwischen Messungen und Rechnungen haben immer große Übereinstimmung gezeigt und sie stärken dadurch die Aussagen der Theorie.

Eine spezielle Größe, die ausgehend von den Ergebnissen am LEP mit 't Hoofts und Veltmans Berechnungsmethode erhalten werden konnte, ist die Masse des sogenannten *top-Quarks*, des schwersten der beiden Quarks, die zu der dritten Familie des Standardmodells gehören. Dieses Quark wurde zum ersten Mal direkt 1995 an dem Fermilabor in den USA beobachtet, aber seine Masse war schon einige Jahre früher vorhergesagt worden. Die Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie war auch hier zufriedenstellend.

### Wann kommt die nächste große Entdeckung?

Ein wichtiger Bestandteil in der Theorie, die 't Hooft und Veltman entwickelt haben, ist ein noch nicht nachgewiesenes Teilchen, das Higgs-Teilchen (Siehe Abb. 1). Ebenso, wie andere Teilchen durch theoretische Beweisführung vorausgesagt wurden, um dann später experimentell nachgewiesen zu werden, warten die Forscher nun auf die direkte Beobachtung des Higgs-Teilchens. Durch Berechnungen, ähnlich denen für die Masse des top-Quarks, weiß man, daß vielleicht einer der zur Zeit arbeitenden Beschleuniger einige Higgs-Teilchen erzeugen kann. Aber der einzige Beschleuniger, der ausreichende Leistung für genauere Studien haben wird, ist der zur Zeit im Bau befindliche LHC (Large Hadron Collider) bei CERN. Jedoch damit müssen sich die Forscher noch einige Jahre gedulden, denn der LHC wird voraussichtlich erst im Jahr 2005 fertiggestellt sein.

## Lesetips

"Background in English" by Professor Cecilia Jarlskog  
(<http://www.nobel.se>)

*In Search of the Ultimate Building Blocks* by Gerard 't Hooft,  
Cambridge University Press 1997.

*The Higgs boson* by Martinus J.G. Veltman, Scientific American,  
November 1986, p.88.

*An Elementary Primer for Gauge Theory* by K. Moriyasu,  
World Scientific Publishing 1983.

*Gauge Theories of the Forces between Elementary Particles*  
by Gerard 't Hooft, Scientific American, June 1980, p. 90.

### Gerardus 't Hooft

geboren 1946 in Den Helder, Niederlande. Bürger der Niederlande. Zum Doktor der Physik promoviert 1972 an der Universität in Utrecht. Professor für Physik an der Universität in Utrecht seit 1977. 't Hooft hat unter anderem 1979 den Dannie Heineman Preis von der American Physical Society und 1982 den Wolfpreis für seine Arbeiten über die Renormierung von Eichtheorien erhalten. Er ist Mitglied der Holländischen Akademie der Wissenschaften seit 1982.



### Martinus J.G. Veltman

geboren 1931 in den Niederlanden. Bürger der Niederlande. Zum Doktor der Physik promoviert 1963 an der Universität in Utrecht. Professor für Physik an der Universität in Utrecht 1966 - 1981 und an der Universität von Michigan, Ann Arbor, seit 1981 (jetzt pensioniert). Veltman hat unter anderem den Hochenergie- und Elementarteilchen-Physikpreis des Jahres 1983 der Europäischen Physikalischen

Gesellschaft für seine Arbeiten über die Renormierung von Eichtheorien erhalten. Er ist Mitglied der Holländischen Akademie der Wissenschaften seit 1981.

## Nobelpreis in Chemie

Die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften hat den Nobelpreis in Chemie für das Jahr 1999 verliehen an Professor Ahmed H. Zewail, California Institute of Technology, Pasadena, USA, weil er nachgewiesen hat, daß man mit Hilfe schneller Laser-Technik sehen kann, wie sich Atome während einer chemischen Reaktion in einem Molekül bewegen.

### Entscheidung der Akademie der Wissenschaften:

*Für seine Studien des Übergangszustands chemischer Reaktionen mit Hilfe der Femtosekundenspektroskopie.*

Der diesjährige Nobelpreisträger in Chemie wird preisgekrönt für seine bahnbrechenden Untersuchungen grundlegender

chemischer Reaktionen, die mit Hilfe ultrakurzer Laserblitze in dem Zeitraum unternommen werden, in dem sie tatsächlich ablaufen. Zewail's Leistungen bedeuteten eine Revolution in der Chemie und in angrenzenden Wissenschaftsbereichen, da diese Art von Untersuchungen es ermöglicht, wichtige Reaktionen zu verstehen und vorauszusagen.

### Die Entwicklung der Femtochemie wird preisgekrönt

Was wäre ein Fußballspiel im Fernsehen ohne die Zeitlupe, die im Nachhinein die Bewegungen der Spieler und des Balls nachvollzieht, wenn ein Tor gefallen ist. Dasselbe gilt für chemische Reaktionen. Die Neugier der Chemiker darauf, chemischen Reaktionen bis in kleinste Einzelheiten folgen zu können, hat immer ausgeklügelte Methoden hervorgebracht. Der diesjährige Nobelpreisträger Ahmed H. Zewail hat Atome und Moleküle mit Hilfe einer "Zeitlupe" während einer Reaktion untersucht und gesehen, was eigentlich geschieht, wenn chemische Verbindungen zerbrechen und neue entstehen.

Zewail hat sich einer Technik bedient, die man als die schnellste Kamera der Welt beschreiben kann. Sie läuft darauf hinaus, daß man so kurze Laserblitze benutzt, daß man den Zeitraum erreicht, in dem die Reaktionen tatsächlich stattfinden, nämlich Femtosekunden (fs). Eine Femtosekunde entspricht  $10^{-15}$  Sekunden, d.h. 0,000000000000001 Sekunden; im Verhältnis zu einer Sekunde ist dies genauso wenig wie eine Sekunde im Verhältnis zu 32 Millionen Jahren. Dieses Gebiet im Bereich der physikalischen Chemie hat den Namen Femtochemie erhalten.

Mit Hilfe der Femtochemie kann man verstehen, warum bestimmte chemische Reaktionen stattfinden, andere aber nicht. Man kann auch erklären, warum die Geschwindigkeit der Reaktionen und ihr Wirkungsgrad von der Temperatur abhängig sind. Rundum auf der Welt untersuchen Wissenschaftler mit Hilfe der Femtosekundenspektroskopie diesen Prozeß in Gasen, Flüssigkeiten und in festen Materialien, auf Oberflächen und in Polymeren. Die Anwendungsbereiche umspannen die Funktion von Katalysatoren und die Konstruktion molekularer elektronischer Komponenten bis hin zu den feinsten Mechanismen der Lebensprozesse und in Zukunft der Herstellung von Arzneimitteln.

### Wie schnell verlaufen chemische Reaktionen?

Wie wir alle wissen, können chemische Reaktionen mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten ablaufen - man braucht nur rostende Nägel mit explodierendem Dynamit zu vergleichen! Gemeinsam für die meisten Reaktionen ist jedoch, daß sich ihre Geschwindigkeit vergrößert, wenn sich die Temperatur erhöht, d.h. wenn die Bewegung der Moleküle heftiger wird.

Daher haben die Wissenschaftler seit langem geglaubt, daß ein Molekül zuerst "aktiviert", sozusagen mit einem Tritt über eine Grenze befördert werden muß, um zu reagieren. Wenn zwei Moleküle zusammenstoßen, so geschieht gewöhnlich nichts, sie prallen lediglich aneinander ab. Aber wenn die Temperatur hoch genug ist, dann ist der Zusammenprall so heftig, daß sie miteinander reagieren und sich neue Moleküle bilden. Wenn ein Molekül so einen kräftigen "Temperaturtritt" bekommen hat, reagiert es unerhört schnell, wobei sich chemi-

sche Verbindungen auflösen und neue entstehen. Dies gilt auch für Reaktionen, die langsam verlaufen, so zum Beispiel bei einem Nagel, der rostet. Der Unterschied besteht nur darin, daß die "Temperaturtritte" in einer langsamen Reaktion seltener eintreffen als in einer schnellen.

Die Grenze wird von den Kräften bestimmt, die die Atome im Molekül, d.h. den chemischen Verbindungen, zusammenhalten; man kann sie in etwa mit der Gravitationsgrenze vergleichen, die eine Mondrakete von der Erde überwinden muß, ehe sie vom Kraftfeld des Mondes eingefangen wird. Aber über den Weg eines Moleküls über diese Grenze und über sein eigentliches Aussehen, wenn es gerade den höchsten Punkt, den sogenannten "Übergangszustand", erreicht hat, wußte man bis in die jüngste Gegenwart nicht viel.

## Hundert Jahre Forschung

Svante Arrhenius, der Chemie-Nobelpreisträger des Jahres 1903, der seinerseits von van't Hoff, dem ersten Chemie-Nobelpreisträger aus dem Jahr 1901, angeregt worden war, beschrieb vor mehr als hundert Jahren eine einfache Formel für die Reaktionsgeschwindigkeit als Funktion der Temperatur. Aber sie galt für viele Moleküle auf einmal, d.h. für makroskopische Systeme, und über verhältnismäßig lange Zeiträume. Erst in der 30er Jahren formulierten H. Eyring und M. Polanyi eine Theorie, die auf Reaktionen in mikroskopischen Systemen mit einzelnen Molekülen baute. In dieser Theorie nahm man an, daß der Übergangszustand in dem Zeitraum, der für molekulare Schwingungen gilt, sehr schnell überwunden würde. Daß man jemals Experimente in so kurzen Zeitabständen machen könnte, davon konnte man damals nicht einmal träumen.

Aber Zewail widmete sich gerade dieser Frage zielbewußt. Gegen Ende der 80er Jahre führte er eine Serie von Experimenten durch, die die Geburt des Forschungsgebiets bedeutete, das Femtochemie genannt wird. Im Prinzip läuft es dabei darauf hinaus, mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Moleküle während des Ablaufs chemischer Reaktionen abzubilden und ein Bild von ihnen genau dann einzufangen, wenn sie sich im Übergangszustand befinden. Die Kamera baute auf neuentwickelte Lasertechnik mit Lichtblitzen von einigen -zig Femtosekunden auf. Die Zeit, die Atome benötigen, um in einem Molekül eine Schwingung auszuführen, beträgt im Normalfall  $10^{-100}$  fs. Daß chemische Reaktionen im gleichen Zeitraum ablaufen sollten in dem Atome in den Molekülen hindurchschaukeln, kann man mit zwei Trapezkünstlern vergleichen, die aufeinander in demselben Zeitraum "reagieren", in dem ihre Trapeze hinundherpendeln.

Was sah man nun, wenn man die Zeitauflösung nach und nach verbesserte? Die ersten Erfolge bestanden aus Entdeckungen von Stoffen, sogenannten Intermediären, die sich auf dem Weg zwischen den ursprünglichen Stoffen und den Schlußprodukten bildeten. Anfänglich handelte es sich um vergleichsweise stabile Moleküle oder Molekülfragmente. Jede Verbesserung der Zeitauflösung führte dazu, daß man neue Glieder einer Reaktionskette, in Gestalt immer kurzlebigerer Intermediärer in das Puzzle einfügen konnte, um dadurch den Reaktionsmechanismus zu verstehen.

Die Leistung, für die Zewail der Nobelpreis verliehen wird, bedeutet, daß wir das Ende des Weges erreicht haben: schnell

ler als gehabt können keine chemischen Reaktionen stattfinden. Mit der Femtosekundenspektroskopie können wir zum ersten Mal in Zeitlupe beobachten, was bei dem Übergang über die Reaktionsgrenze geschieht, und damit auch den mechanistischen Hintergrund verstehen, sowohl der Formel für die Temperaturabhängigkeit von Arrhenius als auch der Formeln, für die van't Hoff den Nobelpreis erhielt.

## Die Femtochemie in der Praxis

Bei der Femtosekundenspektroskopie mischt man die ursprünglichen Stoffe in Form von Molekularstrahlen in einer Vakuumkammer. Danach läßt man einen ultraschnellen Laser zwei Pulse hineinschießen: zuerst einen starken Pump-puls, der das Molekül trifft und es in einen höheren Energiezustand versetzt, und danach einen schwächeren Prob-puls mit einer Wellenlänge, die darauf eingestellt ist, das Molekül in seiner ursprünglichen Form oder in einer veränderten Form zu entdecken. Der Pump-puls gibt den Startschuß für die Reaktion, während der Prob-puls untersucht, was geschieht. Indem man das Zeitintervall zwischen Pump- und Prob-puls verändert, kann man sehen, wie schnell sich das ursprüngliche Molekül verwandelt. Die neuen Erscheinungsformen, die das Molekül annimmt, wenn sich sein Energieniveau erhöht - und vielleicht den ein oder anderen Übergangszustand überschreitet - haben Spektren, die man wie Fingerabdrücke benutzen kann. Das Zeitintervall zwischen den Pump- und Prob-pulsen kann man auf einfache Art dadurch verändern, daß man den Prob-puls mit Hilfe von Spiegeln einen Umweg nehmen läßt. Aber es handelt sich nicht um lange Umwege: das Licht legt die Strecke von 0,03 mm in 100 fs zurück.

Um besser zu verstehen, was passiert, vergleicht man zum Abschluß die Fingerabdrücke und den zeitlichen Ablauf mit theoretischen Simulationen, die auf den Resultaten quantenmechanischer Berechnungen (der Nobelpreis von 1998) der Spektren und Energien für die Moleküle in ihren verschiedenen Zuständen gründen.

## Die ersten Versuche

In seinem ersten Versuch untersuchte Zewail den Zerfall von Jodcyanid:  $\text{ICN} \rightarrow \text{I} + \text{CN}$ . Der Forschungsgruppe gelang es, den Übergangszustand genau in dem Augenblick zu beobachten, als die I-C-Verbindung im Begriff war zu zerbrechen; die Reaktion lief in insgesamt 200 Femtosekunden ab.

In einem anderen wichtigen Experiment untersuchte Zewail die Spaltung von Natriumjodid ( $\text{NaI}$ ):  $\text{NaI} \rightarrow \text{Na} + \text{I}$ . Der Pump-puls erhöht das Energieniveau des Ionenpaars  $\text{Na} + \text{I}^-$ , bei dem der Gleichgewichtsabstand  $2.8 \text{ \AA}$  zwischen den Atomkernen besteht (Abb. 1), zu einer aktivierten Form  $[\text{NaI}]^*$ , die dann eine kovalente Bindung erhält. Indessen veränderten sich die Eigenschaften, wenn das Molekül schwingt; liegen die Atomkerne in ihren äußersten Wendelagen  $10^{-15} \text{ \AA}$  auseinander, so ist die Elektronenstruktur ionisch, während sie also bei kurzem Abstand kovalent ist. An einem bestimmten Punkt während des Schwingungszyklus, wenn die Atomkerne gerade  $6,9 \text{ \AA}$  voneinander entfernt sind, ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß die Moleküle entweder in ihren Grundzustand zurückfallen oder in Natrium- und Jod-Atome zerfallen.

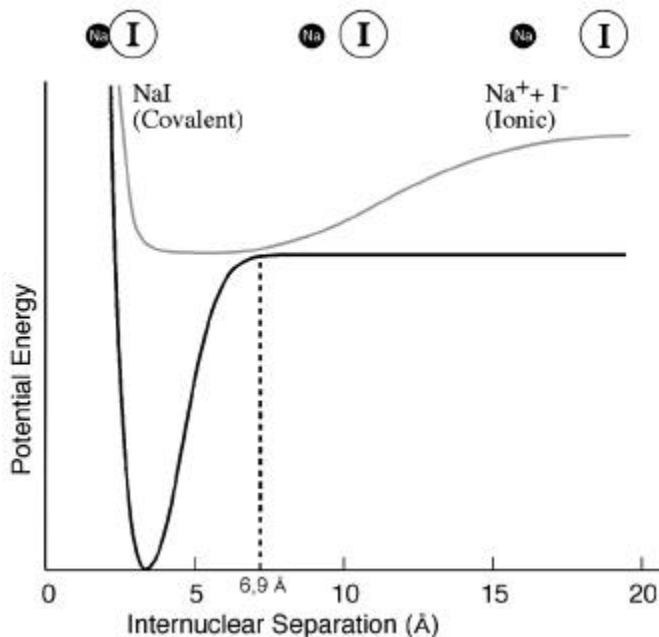


Abb. 1: Potentialenergiekurven, die den ursprünglichen Zustand sowie den Zustand mit einem erhöhten Energieniveau für NaI zeigen. Die obere Kurve zeigt die Molekülschwingungen des NaI bei erhöhtem Energieniveau. Wenn der Abstand zwischen dem Natrium-Kern und dem Jod-Kern kurz ist, dominiert die kovalente Bindung, während die Ionen-Bindung bei längerer Entfernung vorherrscht. Die Schwingungen können mit einer Kugel verglichen werden, die in einer Schale hinunterherrollt. Wenn der Punkt 6,9 Å überschritten wird, besteht die Chance, daß die Kugel zur unteren Kurve hinunterfällt. Dort kann sie in der Grube links (zurück zum Grundzustand) landen oder nach rechts hinausfliegen, d.h. in Natrium- und Jodatome zerfallen.

Zewail untersuchte auch die Reaktion zwischen Wasserstoff und Kohlendioxid:

$\text{H} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$  eine Reaktion, die in der Atmosphäre und bei Verbrennung geschieht. Er wies nach, daß die Reaktion über einen relativ langlebigen Zustand HOCO (1000 fs) abläuft.

Die Frage, warum bestimmte chemische Verbindungen reaktionsfreudiger sind als andere und was geschieht, wenn man zwei gleichartige Verbindungen in einem Molekül hat (werden sie gleichzeitig zerbrechen oder jeweils eine nach der anderen), hat viele Chemiker beschäftigt. Um eine Antwort auf diese Art von Fragen zu erhalten, untersuchten Zewail und seine Mitarbeiter den Zerfall von Tetrafluordijodmethan ( $\text{C}_2\text{I}_2\text{F}_4$ ), in Tetrafluoräthylen ( $\text{C}_2\text{F}_4$ ) und zwei Jodatome (I):



Sie entdeckten, daß die beiden C-I-Verbindungen jeweils eine nach der anderen zerbrochen wurden, obwohl sie im ursprünglichen Molekül gleichwertig waren.

Forschung ist vor allem dann interessant, wenn die Resultate unerwartet sind. Zewail untersuchte die, wie man meinen kann, einfache Reaktion zwischen Benzol, einem Ring mit sechs Kohlenatomen ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), und Jod ( $\text{I}_2$ ), einem Molekül, das aus zwei Jodatomen besteht. Wenn die beiden Moleküle einander nahe genug kommen, bilden sie einen Komplex. Durch den Laserblitz wird erreicht, daß ein Elektron vom Benzol in das Jodmolekül geschossen wird, das dadurch negativ, das Benzol dagegen positiv geladen wird. Die negativen und posi-

tiven Ladungen haben zur Folge, daß Benzol und das nächste Jodatome sich gegenseitig schnell anziehen. Die Bindung zwischen den beiden Jodatomen dehnt sich aus, wenn eins der beiden vom Benzol angezogen wird; das eine Atom löst sich dann und fliegt weg. All das geschieht binnen 750 fs. Zewail entdeckte indessen, daß das nicht die einzige Art und Weise ist, wie einzelne Jodatome gebildet werden können: manchmal fällt das Elektron auf das Benzol zurück. Aber in dem Augenblick ist es für die Jodatome bereits zu spät: wie ein ausgedehntes Gummiband, das zerreißt, zerbricht die Bindung zwischen den beiden Atomen, und sie fliegen beide in verschiedene Richtung.

## Forschungsexplosion

Eine häufig untersuchte Modellreaktion im Bereich der organischen Chemie ist die Ringöffnung des Cyclobutans, um Äthylen zu erhalten, oder die Umkehrung: zwei Äthylenmoleküle, die sich zu Cyclobutan vereinigen. Man kann sich denken, daß die Reaktion direkt über einen Übergangszustand mit einer einfachen Aktivierungsgrenze abläuft, wie es das Schema zur Linken in Abbildung 2 zeigt. Alternativ könnte dies auch durch ein Zweischnittsystem in der Weise geschehen, wie das Schema zur Rechten zeigt, indem zuerst eine Bindung zerbrochen und Tetrametylen als Zwischenprodukt gebildet wird. Tetrametylen wird seinerseits nach der Überwindung einer weiteren Aktivierungsgrenze in das endgültige Produkt verwandelt. Zewail und seine Mitarbeiter konnten mit Hilfe der Femtosekundenspektroskopie nachweisen, daß sich das Zwischenprodukt in der Tat bildete und daß es eine Lebenslänge von 700 fs hatte.

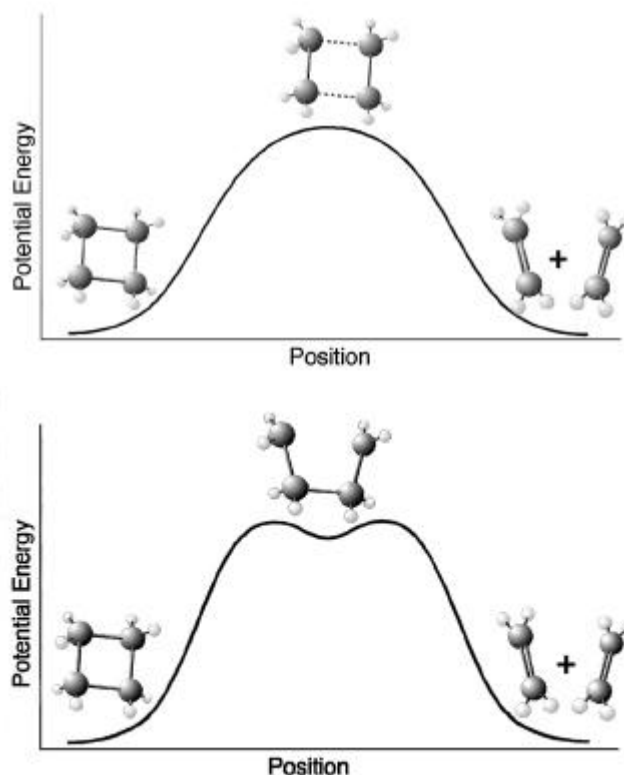
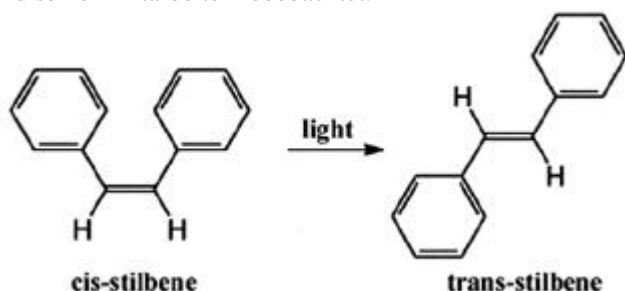


Abb. 2: Wie verläuft eigentlich die Reaktion vom Molekül Cyclobutan zu zwei Äthylenmolekülen? Die Figur oben zeigt, wie die Lagenenergie variiert, wenn die beiden Bindungen gestreckt werden und zerbrechen. Die Figur unten zeigt den gleichen Prozeß, wenn eine Bindung nach der anderen zerbrochen wird.

Eine andere Art der Reaktion, die mit Hilfe der Femtosekundentechnik untersucht werden kann, ist die durch Licht verursachte Umwandlung eines Moleküls von einer Struktur zu einer anderen, die sogenannte Fotoisomerisierung. Die Umwandlung des Moleküls Stilben, das u.a. aus zwei Benzolringen besteht, zwischen den Formen Cis und Trans wurde von Zewail und seinen Mitarbeitern beobachtet.



Sie zogen die Schlußfolgerung, daß sich die beiden Benzolringe während des Prozesses zueinander synchron drehen. In jüngster Zeit hat man ein ähnliches Verhalten auch bei dem Molekül Retinal beobachtet, dem Farbstoff in Rodopsin, dem Pigment in den Augenstäbchen. Der grundlegende fotochemische Schritt für unsere Wahrnehmung des Lichts ist die Cis-Trans-Verwandlung um eine Doppelbindung in Retinal. Mit Hilfe der Femtosekundenspektroskopie haben andere Forscher entdeckt, daß der Prozeß in 200 fs abläuft und daß eine gewisse Schwingung beim Reaktionsprozeß bestehenbleibt. Die Geschwindigkeit der Reaktion deutet darauf hin, daß die Energie des absorbierten Photons zuerst nicht umverteilt wird, sondern direkt zur aktuellen Doppelbindung lokalisiert wird. Dies würde den hohen Wirkungsgrad (70%) der Umwandlung und damit die gute Nachtsehfähigkeit des Auges erklären. Ein weiteres, biologisch wichtiges Beispiel für die Erklärung effektiver Energieumwandlung durch die Femtochemie gilt für die Chlorophyllmoleküle, die in der Fotosynthese das Licht einfangen.

Studien im Femtosekundenbereich werden rundum in der Welt betrieben, nicht nur an Molekülstrahlen, sondern auch an Prozessen auf Oberflächen, so zum Beispiel um Katalysatoren zu verstehen und zu verbessern, in Flüssigkeiten und Lösungsmitteln, um hier die Mechanismen der Lösung von Stoffen und chemische Reaktionen zwischen ihnen in einer Lösung zu verstehen, sowie bei Polymeren, um zum Beispiel neues Elektronikmaterial zu entwickeln. Kenntnisse der chemischen Reaktionsmechanismen sind ebenfalls wichtig, um Reaktionen zu steuern. Oft folgt auf eine gewünschte chemische Reaktion eine Reihe unvorhergesehener, konkurrierender Reaktionen, die zu einer Mischung von Produkten führt und damit zu einem Bedarf an Trennung und Reinigung. Wenn man dagegen die Reaktion dadurch kontrollieren kann, daß man Reaktivität in ausgewählten Verbindungen in Gang bringen kann, könnte man auch dies vermeiden.

Die Femtochemie hat unsere Sicht auf chemische Reaktionen grundlegend verändert. Mit Ausgangspunkt in einem Prozeß, der mit relativ dunklen Metaphoren wie "Aktivierung" und "Übergangszustand" beschrieben wurde, können wir heute die Bewegungen der individuellen Atome so sehen, wie wir sie uns vorstellen. Sie sind nicht länger unsichtbar. Das ist der Grund dafür, daß die Forschung im Bereich der Femtochemie, für die der diesjährige Preisträger den Anstoß gab, eine explosive Entwicklung genommen hat. Mit der schnellsten Kamera

der Welt in Händen setzt nur die Phantasie Grenzen für neue Probleme, die es anzugreifen gilt.

## Lesetips

*"Extended version in English"* by Professor Bengt Nordén

M.A. El-Sayed, I. Tanaka und Y. Molin *"Ultrafast Processes in Chemistry and Photobiology"* Blackwell Science 1995 306 pp, ISBN 0-86542-893-X.

S. Pedersen, J.L. Herek und A.H. Zewail *"The Validity of the Diradical Hypothesis: Direct Femtosecond Studies of the Transition-State Structures"*. Science Vol 266 (1994) 1359-1364.

A.H. Zewail *"The Birth of Molecules"* Scientific American December 1990 p 40-46.

V.K. Jain *"The World's Fastest Camera"* The World and I, October 1995 p 156-163.

*Nobel Symposium: Femtochemistry & Femtobiology: Ultrafast Reaction Dynamics at Atomic-Scale Resolution* (Editor: V. Sundström) World Scientific, Singapore 1996.



Ahmed H. Zewail wurde 1946 in Ägypten geboren, wo er auch aufwuchs. Er begann seine Studien an der Universität von Alexandria und studierte danach in den USA. 1974 promovierte er an der University of Pennsylvania. Nach zwei Jahren an der University of California in Berkeley erhielt er eine Anstellung am California Institute of Technology, wo er seit 1990 die Linus Pauling-Professur in physikalischer Chemie inne hat. Zewail ist ägyptischer und amerikanischer Staatsangehöriger.

## Nobelpreis in Physiologie

Die Nobelversammlung am Karolinischen Institut hat heute beschlossen, den Nobelpreis des Jahres 1999 in Physiologie oder Medizin Günter Blobel für die Entdeckung "Proteine haben eingebaute Signale, die ihren Transport und die Lokalisierung in der Zelle steuern" zu verleihen.

## Zusammenfassung

In unseren Zellen bilden sich ständig zahlreiche lebenswichtige Proteine, die aus der Zelle oder zu den verschiedenen Bestandteilen der Zelle, den Organellen, transportiert werden müssen. Wie können die neugebildeten Proteine in die Umhüllungen der Organellen, die Membranen, dringen, und wie werden sie an den richtigen Platz in der Zelle dirigiert?

Diese Fragen hat der diesjährige Nobelpreisträger in Physiologie oder Medizin, Günter Blobel, beantwortet, der Zell- und Molekularbiologe an der Rockefeller Universität in New York

ist. Bereits Anfang der Siebziger Jahre entdeckte er, daß neu-gebildete Proteine ein eingebautes Signal haben, das entscheidend für ihre Steuerung zu und dem Durchdringen der Membrane des sogenannten endoplasmatischen Netzwerkes ist. In den zwanzig darauf folgenden Jahren hat er dann im Detail die molekularen Mechanismen dieser Prozesse dargelegt. Er hat auch gezeigt, daß ähnliche "Adresszettel" die Proteine zu den übrigen Organellen der Zelle dirigieren.

Die Prinzipien, die Günter Blobel entdeckt und beschrieben hat, haben sich als allgemeingültig erwiesen und funktionieren auf die gleiche Weise in Hefe-, Pflanzen- und Tierzellen. Mehrere erbliche Krankheiten bei Menschen werden verursacht, wenn diese Signale und die Transportmechanismen nicht normal funktionieren. G. Blobels wissenschaftliche Erkenntnisse haben auch dazu beigetragen, daß man Zellen als "Proteinfabriken" effektiver verwenden kann, um wichtige Arzneimittel zu produzieren.

### Viele wichtige Funktionen

Ein erwachsener Mensch besteht aus ungefähr 100.000 Milliarden Zellen. Die Zellen sind aus verschiedenen Bestandteilen, den Organellen, zusammengesetzt, die von Hüllen, den Membranen, umgeben sind. Die Organellen sind auf die Ausführung bestimmter Aufgaben spezialisiert. Einige Beispiele dafür sind der Zellkern, der Erbmasse enthält und von dort aus die Funktionen der Zelle steuert, die Mitochondrien sind das "Kraftwerk" der Zellen, das Energie produziert, und das endoplasmatische Netzwerk ist zusammen mit den Ribosomen für die Produktion von Proteinen verantwortlich.

Jede Zelle enthält ungefähr eine Milliarde Proteine. Die verschiedenen Proteine haben eine Vielzahl von wichtigen Aufgaben, die sie an den verschiedenen Plätzen in der Zelle ausführen. Einige sind beispielsweise das Baumaterial für das Skelett der Zelle, während andere als Enzyme dienen und an bestimmten chemischen Reaktionen beteiligt sind. In den Zellen erfolgen ständig Abbau und Neubildung von Proteinen. Die Bausteine der Proteine sind Aminosäuren. Ein Protein kann aus fünfzig bis zu mehreren tausend Aminosäuren bestehen, die zu langen gefalteten Ketten zusammengefügt sind.

### Wie können die Barrieren durchdrungen werden?

Daher ist es lange ein Rätsel gewesen, wie große Proteine die Barrieren durchdringen konnten, die aus den fetthaltigen, dichten Membranen der Organellen bestehen. Vor einigen Jahrzehnten wußte niemand, wie die neu gebildeten Proteine an ihren richtigen Platz in der Zelle dirigiert werden, um dort ihre Aufgaben auszuführen.

Günter Blobel konnte diese beiden Rätsel lösen. Ende der Sechzigerjahre schloß er sich an George Palades berühmtes zellbiologisches Laboratorium am Rockefellerinstitut in New York an. Hier hatten Forscher schon einige Jahrzehnte den Aufbau der Zelle und die Prinzipien, wie die neu gebildeten Proteine aus den Zellen transportiert werden, studiert. Für diese Arbeit wurde George Palades im Jahr 1974 mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin ausgezeichnet. (Er teilte den Preis mit den belgischen Forschern Albert Claude und Christian de Duve.)

### "Die Signalthypothese"

Die Forschung Günter Blobels baute auf der Tradition auf, die in Palades Laboratorium entwickelt worden war. Er studierte speziell, wie ein neu gebildetes Protein, das aus der Zelle transportiert werden soll, zu einem besonderen Membransystem, dem sogenannten endoplasmatischen Netzwerk, gesteuert wird. Im Jahr 1971 formulierte er eine erste Version der sogenannten Signalthypothese, in der er sagte, daß Proteine, die aus der Zelle ausgeschieden werden sollen, ein eingebautes Signal enthalten, das sie zu und durch die Membrane dirigiert.

In eleganten biochemischen Versuchen zeigte G. Blobel im Jahr 1975 die verschiedenen Schritte dieses Prozesses auf. Das eigentliche Signal besteht aus einer Anzahl von Aminosäuren in einer bestimmten Reihenfolge, die einen Teil des Proteins darstellen. Er war auch der Ansicht, daß das Protein die Membrane des endoplasmatischen Netzwerkes durch einen Kanal (Abb. 1) passiert. In den folgenden zwanzig Jahren untersuchten G. Blobel und seine Mitarbeiter schrittweise die molekularen Details dieser Prozesse. Allmählich konnte man sowohl die Richtigkeit der Signalthypothese als auch deren Allgemeingültigkeit beweisen; diese Prozesse funktionieren nämlich gleich bei Hefe- und auch bei Pflanzen- und Tierzellen.

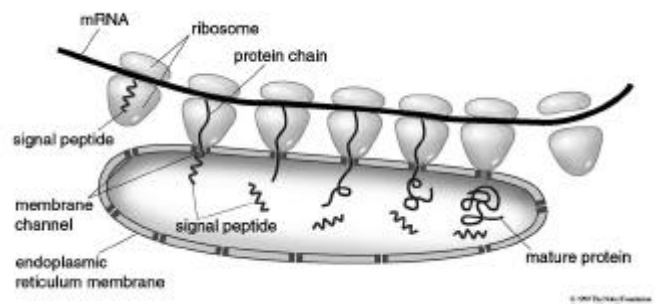


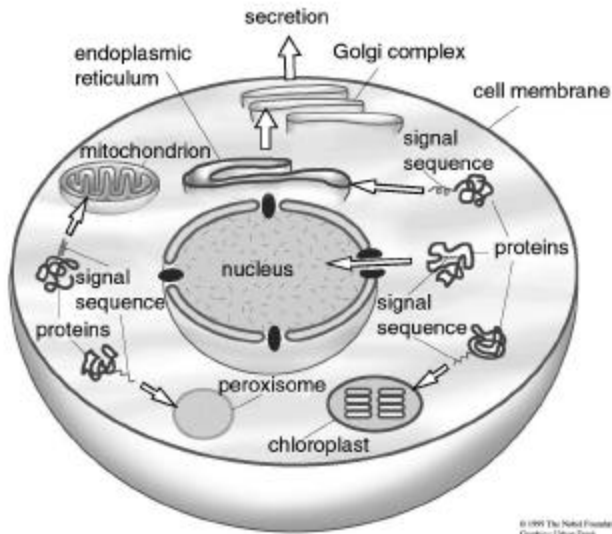
Abb. 1: "Die Signalthypothese". Proteine, die aus den Zellen exportiert werden sollen, werden von Ribosomen gebildet, die auf dem endoplasmatischen Netzwerk angesiedelt sind. Die genetische Information der Erbmasse (DNA) wird auf den Boten-RNA (mRNA) übertragen, der dann die Zusammenfügung der Proteinbausteine, der Aminosäuren, steuert. Zuerst wird ein sogenanntes Signalpeptid gebildet, das ein Teil des Proteins ist. Dieses Signalpeptid steuert mit Hilfe von Bindeproteinen Ribosomen zu einem Kanal in der Membrane des endoplasmatischen Netzwerkes. Die wachsende Proteinkette dringt danach durch den Kanal ein. Das Signalpeptid wird abgespalten und das fertige Protein in dem endoplasmatischen Netzwerk freigesetzt. Dann wird das Protein aus der Zelle hinaus transportiert.

### "Adresszettel" an die Organellen

Dann konnte Günter Blobel in Zusammenarbeit mit anderen Forschergruppen bald beweisen, daß ähnliche eingebaute Signale den Transport von Proteinen auch zu anderen Organellen steuern. Auf Grund seiner Arbeiten formulierte Günter Blobel im Jahr 1980 ein generelles Prinzip, demzufolge Proteine eingebaute sogenannte topogene Signale enthalten, die die Proteine an den richtigen Platz in der Zelle steuern und auch dafür Sorge tragen, daß sie auf die richtige Art und Weise in die verschiedenen Membranen eingebaut werden. Daß seine Prinzipien richtig waren, ist überzeugend bewiesen worden. Heute kennt man eine Reihe von solchen Signalen, die die Proteine zu den verschiedenen Teilen der Zelle (Abb. 2) dirigieren. Die Signale kann man mit Adresszettel vergleichen, die es ermöglichen, daß das Gepäck eines Flugreisenden an den rich-



tigen Ankunftsort gelangt, oder daß ein Brief den richtigen Empfänger erreicht. Tatsächlich bestehen diese sogenannten Signalsequenzen aus verschiedenen Kombinationen von Aminosäuren, die wie ein "Schwanz" am Ende eines Proteins sitzen, manchmal weiter drinnen in dem Protein.



*Bild 2. Beispiel für zielgerichteten Transport mit Hilfe von sog. topogenen Signalen. Das Bild zeigt schematisch eine Zelle mit einigen ihrer Bestandteile, den Organellen. (Chloroplast ist eine Organelle, die in Pflanzenzellen vorkommt, aber nicht in Tierzellen.) Die Organellen haben eine spezielle Funktion und sind von Hüllen umgeben, den Membranen. Neugebildete Proteine werden mit besonderen "Adresszetteln", sog. Signalsequenzen, versehen, die bewirken, daß die Proteine an den richtigen Platz in der Zelle dirigiert werden und auch die Membranen der Organellen durchdringen können. Die eigentliche Signalsequenz besteht aus einer gewissen Anzahl von Aminosäuren, meistens an dem einen Ende eines Proteins.*

## Die Bedeutung von Günter Blobels Entdeckung

Günter Blobels Entdeckung ist von großer Bedeutung für die moderne Forschung auf dem Gebiet der Zellbiologie. Wenn sich eine Zelle teilt, müssen zahlreiche neue Proteine produziert und neue Organellen gebildet werden. Eine korrekte Lokalisierung der Proteine der Zelle ist Voraussetzung für den Aufbau und die richtige Funktion der Zelle. Blobels Forschungserkenntnisse haben wesentlich zum Verständnis des molekularen Mechanismus dieser Prozesse beigetragen. Die Kenntnisse der sog. topogenen Signale haben auch das Verständnis für eine Reihe medizinisch bedeutungsvoller Mechanismen gefördert. Unser Immunsystem beruht beispielsweise in hohem Grad auf topogenen Signalen, u.a. bei der Produktion von Antikörpern.

Günter Blobels Forschung hat auch den molekularen Mechanismus bei der Entstehung einer Reihe von erblichen Krankheiten erklären können. Ist ein Sortierungssignal in einem Protein verändert, kann das dazu führen, daß sich das Protein an dem verkehrten Platz in der Zelle ansiedelt. Ein Beispiel dafür ist die Erbkrankheit primäre Hyperoxalurie, die u.a. schon in jungen Jahren zu Nierensteinen führt. Bestimmte erbliche Formen von stark erhöhtem Cholesterin im Blut sind auch auf fehlerhafte Transportsignale zurückzuführen. Andere erbliche Krankheiten, z.B. zystische Fibrose, werden dadurch verursacht, daß die Proteine nicht an ihren richtigen Bestimmungsort gelangen.

## Zukünftige Anwendungen

In naher Zukunft werden alle Proteine des Menschen im Detail bekannt werden. Die Kenntnis der topogenen Signale wird dann eine noch größere Bedeutung bekommen. Die meisten Proteine enthalten nämlich ein oder mehrere topogene Signale. Dieses Wissen wird das Verständnis für krankhafte Prozesse fördern und kann für die Entwicklung neuer Behandlungsmethoden angewandt werden. Bereits heute werden Arzneimittel in Form von Proteinen hergestellt, z.B. Insulin, Wachstumshormon, Erythropoetin und Interferon. Normalerweise werden dabei Bakterien verwendet, aber damit gewisse menschliche Proteine funktionieren können, müssen sie in komplexeren Zellen, z. B. Hefezellen, produziert werden. Mit Gentechnologie werden die Gene für die gewünschten Proteine mit DNA-Sequenzen versehen, die die Transportsignale bestimmen. Zellen, denen die veränderten Gene zugeführt wurden, können dann effektiv als Proteinfabrik genutzt werden. Größeres Wissen darüber, wie die Proteine zu verschiedenen Teilen der Zelle dirigiert werden, ermöglichen auch die Konstruktion neuer Arzneimittel, die sich an einen gewissen Typ der Organellen richten mit dem Zweck, verschiedene Defekte zu korrigieren. Zellen auf diese besondere Art umbauen zu können, wird für die zukünftige Zell- und Gentherapie wichtig sein.

Günter Blobel, geboren am 21. Mai 1936 in Waltersdorf (Deutschland) studierte er an der Universität Tübingen Medizin (Abschluß 1960) und erwarb ein Doktorat aus Onkologie im Jahr 1967 an der Universität von Wisconsin in Madison, USA. Als junger Forscher ging er dann an die Rockefeller Universität



in New York, um am Laboratorium für Zellbiologie bei Philip Siekevitz und George Palade (Nobelpreis 1974 für Beiträge zur Aufklärung von Struktur und Funktion der Zellen) zu arbeiten. Seine Karriere war steil, bereits 1976 war er ordentlicher Professor und 1992 bekam er den J.D. Rockefeller-Lehrstuhl. Zahlreiche bedeutende Auszeichnungen ab 1978 bezeugen die allgemeine Anerkennung seiner Forschungen, so erhielt er 1983 die Warburgmedaille der Deutschen Biochemischen Gesellschaft. Er ist Mitglied mehrerer wissenschaftlicher Akademien.

Seine Verbundenheit mit dem alten Europa drückt sich nicht nur in einem Zweitwohnsitz in Piemont aus, sondern durch seinen Einsatz als Gründer eines Vereins Friends of Dresden, der die Wiederherstellung von Dresdens Architektur und Kunsterbe unterstützt.