

Die Draisine liefert eine schöne Analogie zum Bewegungsablauf des Motor-moleküls Myosin. Während sich das Laufrad jedoch mit Muskelkraft fortbewegt, wird der Schwenk des Hebelarms beim zellulären Motor durch eine Art Zelltreibstoff, das so genannte Adenosin-tri-phosphat (ATP), ausgelöst.

häufig über Geißeln verfügen. Allerdings wird der Bakterienmotor nicht durch Dyneinmoleküle, sondern andere, großteils noch unverstandene molekulare Mechanismen angetrieben. Fest steht, dass es sich dabei um einen rotierenden Motor handelt, der mit einer atemberaubenden Geschwindigkeit von bis zu 100 000 Umdrehungen pro Minute wie eine Turbine um eine Achse kreist und die Bewegungsenergie dabei auf die Bakteriengeißel überträgt.

**EINE ZELLE IST KEIN WACKELPUDDING**

Während sich diese Bewegungsvorgänge noch vergleichsweise einfach unter dem Mikroskop betrachten lassen, bedarf es schon ausgeklügelter Visualisierungsmethoden, um jene Transport- und Bewegungsvorgänge zu erfassen, die sich innerhalb einzelner Zellen abspielen. Längst hat sich durch die molekularbiologische Forschung auch das Bild davon geändert, was eine Zelle eigentlich ist: Weit davon entfernt, eine Art organischer Wackelpudding zu sein oder wie Mutters Nähkörbchen alles nur in buntem Durcheinander zu enthalten, besitzen Körperzellen einen hoch organisierten und aktiv gesteuerten Binnenverkehr, gegenüber dem jedes großstädtische U-Bahn-Netz lächerlich simpel erscheint.

Die Infrastruktur für diesen Zellverkehr bilden vor allem die „Mikrotubuli“; das sind winzige Eiweißröhrchen, welche die Zelle kreuz und quer durchziehen. Direkt unterhalb der Zellmembran, in der Zellerperipherie, enden die Mikrotubuli allerdings

# Die **Triebfeder** des Lebens

*In den Körperzellen herrscht ein ständiger Verkehr von Zellbaustoffen, Signalmolekülen, Krankheitserregern und Stoffwechsel-Abbauprodukten. Hinter der Transportleistung stecken Zigtausende von molekularen Motoren. Die winzigen Eiweißmaschinen verfrachten nicht nur zelluläres Stückgut von einem Ende der Zelle zum anderen. Ebenso machen sie Zellteilungen und auch Muskelbewegungen überhaupt erst möglich. Molekulare Motoren findet man in Bakterien und Amöben ebenso wie in Pflanzen, in Muskelfasern, in weißen Blutkörperchen oder in Nervenzellen – und sie sind Forschungsgegenstand an Instituten der **MAX-PLANCK-GESellschaft**.*

**D**as Diktum gilt als eine der ältesten und anschaulichsten Definitionen des Lebendigen: Leben ist Bewegung. Wo sich etwas von alleine regt und rührt, da rumort das Leben und bietet dem Tod die Stirn. Jeder Schritt, jeder Atemzug, selbst jeder Wadenkrampf ist ein untrügliches Zeichen unserer Vitalität. Doch ohne molekulare Motoren wäre all das unmöglich. Seit einigen Jahrzehnten sind diese Eiweißkomplexe bekannt, doch ihre überraschende Vielfalt beginnen die Wissenschaftler erst in jüngster Zeit zu verstehen. Vor allem drei Familien von Eiweißmolekülen sind für den zellulären Nahverkehr verantwortlich: die Myosine, die Kinesine und die Dyneine. Jede dieser Familien besitzt Dutzende von Varianten, die jeweils unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Doch der grundlegende Mechanismus aller drei Motortypen ist ebenso einfach wie genial: Alle drei Proteine können ihre komplizierte räumliche Struktur derart verändern, dass beispielsweise ein hebelartig hervorstehender Eiweißarm umklappt – und so einen winzigen Bewegungsimpuls erzeugt.

Dabei verbrauchen die Motoren eine Art Zelltreibstoff, das Adenosin-tri-phosphat (ATP). In den kleinen ATP-Molekülen speichert die Zelle die Energie, die bei der Verbrennung der Nahrungskalorien freigesetzt wird. Will man die molekularen Maschinen mit Automotoren vergleichen, dann wäre ATP das Benzin. Tatsächlich liegt hierin eine der großen Überraschungen der Zellbiologie: In der Welt der Moleküle finden sich aus purem Eiweiß aufgebaute Motoren, die – analog zu den technischen, vom Menschen gemachten Maschinen – Scharniere, Hebel, Federn und Kupplungsmechanismen aufweisen und deren Kraft und Geschwindigkeit sich mit ausgeklügelten Experimenten genauso messen lässt wie die Leistung eines 7er-BMW. Bestes Beispiel für die Arbeit der molekularen Motoren ist die Muskelkontraktion. Legt man Muskelfasern unter ein Mikroskop, lassen sich darin zwei Typen von Filamenten – haarfeine, lang gestreckte Eiweißfäden – entdecken. Die dünnen Filamente bestehen großteils aus dem Zelleiweiß Aktin. Die dicken Filamente dagegen setzen sich aus Myo-

sin zusammen. Wie in einem mit zwei verschiedenen Garnen sauber gewebten Tuch liegen dicke und dünne Filamente im Wechsel nebeneinander. Zieht sich der Muskel zusammen, gleiten die dicken und dünnen Filamente aneinander vorbei und schieben sich ineinander wie die Finger zweier Hände. Dadurch verkürzt sich die Muskelfaser binnen Millisekunden auf einen Bruchteil ihrer ursprünglichen Länge.

**MYOSINMOLEKÜLE MIT HEBELWIRKUNG**

Unter einem hoch auflösenden Elektronenmikroskop kann man den Mechanismus dieser Gleitbewegung erkennen: Zwischen den dicken Myosin- und den dünnen Aktinfilamenten gibt es nämlich brückenartige Querverbindungen. Diese sind nichts anderes als die beweglichen Arme der Myosinmoleküle, die um bis zu 70 Grad abknicken können und dabei wie winzige Hebel wirken. Jeder dieser Nanohebel kann freilich nur eine verschwindend geringe Kraft erzeugen, und Berechnungen legen nahe, dass zehn Milliarden Myosinmotoren notwendig sind, um eine Einkaufsta-

sche von fünf Kilogramm Gewicht zu heben. Tatsächlich sind in den Muskelfasern unzählige Myosinmoleküle hintereinander geschaltet, deren Arme bei der Muskelkontraktion in koordiniertem Takt zu schlagen beginnen. Wie eine Galeere mit vielen Ruderern schiebt sich dadurch das Myosinfilament an den benachbarten Aktinfäden vorbei.

Doch ist die Muskelkontraktion nur der offensichtlichste – und täglich erfahrbare – Effekt, den molekulare Motoren haben. Denn nicht nur der rekordverdächtige 100-Meter-Sprint, auch der Wettlauf der Spermienzellen in den Eileitern hin zum befruchtungsfähigen Ei wäre ohne die mikroskopisch kleinen Maschinchen nicht denkbar. Spermien bewegen sich mittels einer langen Geißel vorwärts, die eine wellenförmige Schlagbewegung ausführt. Der schnelle Geißelschlag wird dabei offenbar erst durch besondere Signalstoffe im weiblichen Reproduktionstrakt in Gang gesetzt. Die eigentliche Antriebsmaschine im Innern der Geißel besteht aus zahlreichen Dyneinmotoren, die in einen kompliziert aufgebauten Eiweißfaden (dem *Axonem*) eingelagert sind und durch Verbiegebewegungen das Schlagen des Spermieschwänzchens auslösen.

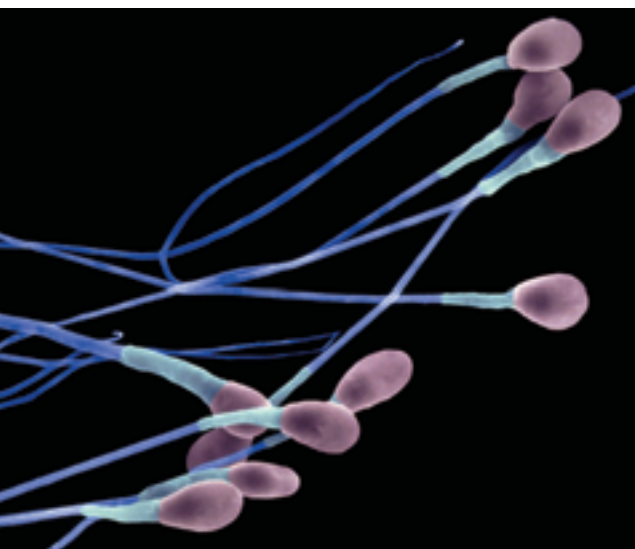
Ein ähnlicher Vortrieb findet sich auch bei Bakterien, die ebenfalls

ILLUSTRATIONEN: RÖHRER

Hier finden sich stattdessen zahlreiche Aktinfilamente, die in den meisten Körperzellen – anders als in Muskelfasern, wo sie sauber parallel nebeneinander liegen – ein dichtes Geflecht bilden. Während Mikrotubuli gewissermaßen die Autobahnen der Zelle sind, gleichen die Aktinfilamente eher den verwinkelten Gassen einer Altstadt. Zusammen mit den so genannten intermediären Filamenten bilden diese drei Filamenttypen das Zell- oder Cytoskelett.

Dieses Skelett dient den Zellen zum einen als dreidimensionales Stützgerüst und fungiert zum ande-

Nicht nur der rekordverdächtige 100-Meter-Sprint (rechts) bei Olympischen Spielen, sondern auch der Wettlauf der Spermienzellen (unten) hin zum Ei wäre ohne molekulare Motoren nicht denkbar.



FOTOS: MAURITUS/CORBIS

ren als Leitsystem für den Zellinnenverkehr. Molekulare Motoren können an das Cytoskelett andocken und auf den fadenförmigen Eiweißschienen wie Draisinen auf Eisenbahngleisen hin- und herfahren. Dabei nehmen die Motorproteine das unterschiedlichste Transportgut gleichsam huckepack, befördern beispielsweise molekulare Baustoffe und Rezeptoren vom Zellzentrum zur Zellmembran und bringen von dort Signalmoleküle zum Zellkern zurück, um hier wiederum genetische Botenstanzen (messenger RNA) aufzuladen und zu den Eiweißfabriken der Zelle zu verfrach-

ten. Kurz: Motorproteine sind die Packesel der Körperzellen.

Erst teilweise ist bekannt, wie es die molekularen Motoren schaffen, die unterschiedlichen Transportpakete auf ihrer Reise durch die Zelle an sich zu binden. Offenbar gibt es eine ganze Reihe von „Linker-Proteinen“, die wie eine spezifische Anhängerkupplung die jeweilige Fracht an die Motoren koppeln. Tatsächlich kann ein und dasselbe Frachtgut auf verschiedenen Motortypen huckepack reiten, wodurch im Wesentlichen die Transportrichtung bestimmt wird. So weiß man, dass Kinesine – die in ihrer Struktur mit den Myosinen eng

verwandt sind und sich mit ihren beweglichen Armen an den Mikrotubuli entlanghangeln – häufig ihr Frachtgut vom Zellinnern zur Zellperipherie befördern. Dyneine dagegen scheinen sich oft in umgekehrter Richtung, also von außen nach innen, zu bewegen.

**MARSCH IN BEIDE RICHTUNGEN**

Doch ist die Koordination des Zellverkehrs noch weit ausgeklügelter als bisher angenommen. Inzwischen haben die Forscher Kinesine entdeckt, die nicht nur in einer, sondern in beiden Richtungen marschieren

können. Hinzu kommt, dass manche Zellfracht zunächst entlang der schnellen Mikrotubuli durch die Zelle rast, um in der Nähe der Zellmembran mittels Myosinmotoren auf die Aktintrassen überzuwechseln – ganz so, wie manche Straßenbahnen über Land auf Bundesbahngleisen fahren können, innerhalb der Stadt aber mit einem anderen Stromabnehmer die Tramschienen benutzen.

In den vergangenen Jahren hat die Forschung am Zellskelett auch gezeigt, dass das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten ein noch weitaus komplexeres Zellverhalten auslösen kann. Tatsächlich handelt es sich bei den Mikrotubuli und den Aktinfilamenten keineswegs um starre Baumaterialien, sondern um sich dynamisch auf- und abbauende Mikrostrukturen. „Das Zellgerüst wird ständig umgebaut, und dabei sind zahlreiche regulierende Moleküle im Spiel“, erklärt Jonathon Howard, Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden. So können Mikrotubuli, ähnlich wie Aktinfilamente, von einem Wachstums- in einen Schrumpfmodus umschalten – „catastrophe“ nennen Wissenschaftler diesen Vorgang –, um dann wieder in den Wachstumsmodus („rescue“) zurückzukehren. „Mikrotubuli sind Maschinen, sie verbrauchen Energie, können schieben und ziehen und alles Mögliche in der Zelle hin- und herbewegen“, sagt Howard. Die Zelle verlegt also nicht nur gewissermaßen ihre eigenen Transportgleise ständig neu, sondern die Gleise selber werden zu molekularen Motoren.

Dieses Verhalten wird nirgends deutlicher als bei der Zellteilung, der Mitose. Seit langem wissen die Forscher, dass sich dabei die Chromosomenhälften (Chromatiden) gleichmäßig auf die Tochterzellen verteilen. Zunächst reihen sich die Chromosomen hübsch regelmäßig am Zelläquator auf. Dann wandern die Chromatiden zu den Zellpolen, die Zelle schnürt sich in der Mitte ab. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die so genannte Mitosespindel, die in erster Linie aus Mikrotubuli besteht.

Die Tubuli docken von beiden Seiten an die Chromosomen an und ziehen die Chromatiden – ähnlich wie Seilwinden – zu den entgegengesetzten Polen. Wird der dynamische Umbau der Mikrotubuli dagegen mit dem „Spindelgift“ Colchicin blockiert, unterbleibt auch die Mitose.

**DAS GEHEIMNIS DER ASYMMETRIE**

Noch rätseln die Wissenschaftler darüber, wie die Dynamik des hoch komplexen Spindelapparats – einer wahren Präzisionsmaschine – im Einzelnen gesteuert wird. „Wahrscheinlich spielen dabei verschiedenste Interaktionen zwischen den Mikrotubuli, Aktinfilamenten und klassischen Motorproteinen eine Rolle“, sagt Howard. Seine Arbeitsgruppe konnte beispielsweise nachweisen, dass sich Zellen nicht genau in der Mitte, sondern asymmetrisch teilen, wenn die mit den Mikrotubuli generierten Zugkräfte auf der einen Seite des Spindelapparats größer sind als auf der anderen und dadurch die Mitosespindel in eine exzentrische Position verlagert wird. Dieser Mechanismus, der Zellen unterschiedlicher Größe produziert, könnte für die Gewebe- und Organentwicklung während der Embryonalphase von entscheidender Bedeutung sein.

Unterdessen denken Howard und seine Kollegen bereits weiter. Denn wenn, so die Überlegung, molekulare Motoren in den Zellen derart präzise arbeiten, dann könnte man sie möglicherweise auch für miniaturisierte Herstellungsprozesse technisch nutzen. Beispielsweise ließen sich DNA-Stücke an Motormoleküle koppeln, um die Strom leitenden Gen-Schnipsel zu miniaturisierten Drähten zusammenzubauen. Dereinst könnten sogar ganze Nano-Fabriken mithilfe der Zellmaschinchen betrieben werden, spekuliert Howard. Wenn auch solche molekularen Produktionsstraßen derzeit noch Zukunftsmusik bleiben – unvorstellbar ist es nicht, dass die Motoren des Lebendigen eines Tages die Welt der Technik erobern.

MARTIN LINDNER



**WISSEN  
MACHT  
ERFOLG  
REICH**

Der Wettbewerb geht weiter.  
Wenn Sie mehr Wissen wollen:  
[www.futuresax.de](http://www.futuresax.de) oder  
Infoline 01803 - 30 60 30

Businessplan-Wettbewerb Sachsen

futureSAX  
Gründen und Wachsen in Sachsen

Umfangreiches kostenloses  
Seminarprogramm für alle  
Teilnehmer + Preisgeld von  
50.000 Euro für die Besten!