1.1 Der Sturm im Reagenzglas

Wir können sie nicht sehen, wir wissen zwar ziemlich genau, wie es im Inneren aussieht, aber wir werden es nie schaffen, hineinzukommen.

Wir wissen nur: Die Welten im Kleinsten sind vollkommen anders als die, die wir kennen und in der wir leben. In unserer Welt können wir durch Straßen gehen, es stehen Häuser, es fahren Autos und Eisenbahnen.

Könnten wir tiefer ins Innere unseres Körpers und unserer Organe in die Moleküle fahren, aus denen wir bestehen, würden wir erhebliche Überraschungen erleben:

Stürmisch geht es zu, rauh und extrem unwirtlich. Kein Ort, an dem wir uns aufhalten würden. Und doch wollen Wissenschaftler in diesen winzigen Welten Maschinen bauen - die kleinsten Maschinen der Welt. Zu reizvoll sind die Möglichkeiten, die sich dort bieten.

Sie träumen von Robotern, die dermaleinst durch unsere Blutbahnen tauchen und Reparaturen in unserem Körper vornehmen können. Ihnen schweben sogar molekulare Systeme vor, die Informationen speichern und rechnen können. Diese Maschinen sollen sich schließlich zuguterletzt selbst zusammenbauen, ohne daß ein Ingenieur eingreift.

Jetzt haben Wissenschaftler angefangen, Maschinen im Nanobereich zu konstruieren, zwar noch weit davon entfernt, eindrucksvolle Produktionsanlagen errichten zu können, doch erste Versuche sind schon zu bewundern. Denn vorher müssen die Nano-

Baumeister bei ihren ersten Expeditionen erst einmal verstehen, wie diese kleinen Welten funktionieren. Und sie benötigen dazu Werkzeuge.

1.2 In der stürmischen Nanowelt

»Stellen Sie sich vor, Sie stehen auf einer einsamen Insel und es bläst ein Orkan von 300 km/h.«

»Man befindet sich in einem ganz schlimmen Hagelsturm, und gleichzeitig, das ist dann schwer, sich das vorzustellen, bewegt man sich durch eine träge, viskose Masse.«

»Was dort auf das Protein andonnert, ist sozusagen die Hölle. Da kommen Wassermoleküle mit Hunderten von Metern pro Sekunde angeflogen und donnern auf dieses Protein drauf, und es ist alles permanent in Bewegung.«

»Man selber wird ständig hin und her geworfen, aber es fällt einem selber unheimlich schwer, Bewegung zu erzeugen.« »Es zerlegt Sie ab und zu, und dann werden Sie immer wieder in ein Fass von Teer getaucht. Ich glaube, man kann es sich eigentlich gar nicht vorstellen. Wir sind geprägt von unserer makroskopischen Welt. Da muß man einfach gewisse Randbedingungen hinnehmen, die auf der Nanometerskala gelten.«

So schildern Wissenschaftler der Technischen Universität München anschaulich, wie es aussehen würde, wenn wir uns ungefähr eine Milliarde mal kleiner machen und in die Nanowelten eintauchen könnten, in der Moleküle »leben«. In diesen Welten wollen sie mit den Baumaterialien aus biologischen Syste-

men, ähnlich wie Legosteine, neue Maschinen zusammensetzen, die verschiedene Aufgaben erledigen können sollen.

»Das Einzige, das einem letztendlich übrigbleibt, ist eben diese Energie, die von einem Sturm geliefert wird, umzusetzen in eine Bewegung in dem Medium, in dem man sich befindet. Und das ist im Grunde genommen das Geheimnis von den Nanomaschinen.«

1.3 Basteln und Stricken auf der Nanoskala

Hendrik Dietz, Professor für Biophysik, leitet das »Dietz Lab« im Laboratorium für Biomolekulare Nanotechnologie an der Technischen Universität München. Das Ziel seiner Arbeitsgruppe ist die Erforschung neuer Methoden in biomolekularer Physik. Oder wie er es einfacher ausdrückt: Basteln und Stricken auf der Nanoskala.

Der erstaunlich junge Professor, der bereits in Harvard arbeitete, ist fasziniert vom Leben, das sich in den Zellen jedes Organismus abspielt. Er hat für seine Diplomarbeit die »Mechanik des grün fluoreszierenden Proteins« untersucht und darüber geforscht, wie viel Kraft man aufwenden muß, um Proteine zu biegen.

Abb. 1 Hendrik Dietz: Basteln und Stricken auf der Nanoskala

Das ist zugleich der spannende Kern dieser relativ jungen Forschungsrichtung: Proteine machen mehr als die Hälfte der Masse jeder einzelnen Zelle aus und sind – das wissen die Forscher schon seit langem – an den meisten Prozessen in der Zelle entscheidend beteiligt.

Sie sind zum Beispiel für einen fundamentalen Prozeß der Nahrungsaufnahme verantwortlich, bei dem die Bestandteile der Nahrung in kleine Einheiten richtiggehend »zerhackt« werden, sodaß sie der Körper überhaupt erst verdauen kann. Sie steuern ferner die Replikation, also die Kopiererei und Vervielfältigung der DNA und sind für Kommunikationsprozesse in der Zelle verantwortlich und dienen daneben vielfach auch als Transporteur für andere Stoffe. Doch unklar ist bisher, wie diese Beteiligung genau aussieht.

Jetzt ist diese »Arbeit« der Proteine in den Fokus der Wissenschaftler gerückt. Deren grundlegende Erkenntnis: Biologische Aktivitäten der Proteine lassen sich offenbar immer auf mechanische Veränderungen zurückführen.

Proteine ändern ihre Form, verbiegen sich gewissermaßen, und diese Formänderungen sind der entscheidende Faktor für ihre Funktionen. Voraussetzung dieser Formänderung ist eine – wenn auch noch so winzige – Kraft.

Hendrik Dietz hat diese Kraft gemessen. Dazu »taucht« er in die neuen Welten ein und erforscht sie. Rund 4000 bis 5000 Eiweiße arbeiten in einer einzigen Zelle nach strengen, aber verblüffend einfachen Regeln. Alle Aufgaben sind miteinander verbunden,

und es funktioniert alles perfekt. Und doch sind diese Welten völlig verschieden von der, in der wir leben, sagt er.

»Moleküle erleben so eine Welt. Zum Beispiel Schwingungen, wie wir sie kennen, in denen, wenn man eine Feder auslenkt, die dann zum Beispiel vor und zurückschwingt – so etwas gibt es auf der Nanometerskala gar nicht. Wenn zum Beispiel etwas aufgrund der großen Reibung in einem Lösungsmittel verformt wird, gibt es Kriechvorgänge. Und das ist total gegenintuitiv und hat ganz interessante Auswirkungen darauf, wie sich diese Moleküle eigentlich verhalten.«

Mit Intuition erfassen läßt sich für Menschen aus unserer Welt nichts mehr. Erfahrungen aus unserer großen, makroskopischen Welt gelten im Nanokosmos nicht mehr. Hendrik Dietz weiter: »Ein anderer Aspekt ist, daß diese Moleküle einem regelrechten thermischen Sturm, einem Hurrikan, unterworfen sind. Der entzieht sich auch total unserer Intuition.

Ein wesentliches Element für die Funktion von Molekülen sind Fluktuationen. Es ist ungefähr so, wenn Sie sich wie wild partiell immer wieder zerlegen und wieder zusammensetzen, Ihre Arme und Beine ganz schlimm herumwedeln würden und der Kopf ab und zu mal abfällt und wieder ansetzt – so müssen Sie sich das vorstellen. Aber diese Arten von Strukturänderungen sind absolut essentiell für die Funktion von diesen Makromolekülen.«

Nanomaschinen - damit sind, das muß gleich am Anfang klargestellt werden, nicht jene Gebilde aus Silizium gemeint, die ähnlich wie Computerchips meist aus festen Stoffen »herausgeätzt« oder neuerdings mit Nanodruckern schichtweise aufgebaut werden.

Die mit der Aufmerksamkeit garantierenden Vorsilbe »Nano« garnierten Visionen zeigen meist Zahnräder, die locker auf dem Knie einer Ameise liegen, oder Bilder, von denen die Forscher fest behaupten, es handele sich um vier Räder an einem Nanoauto. Nur drehen können die sich noch nicht, weil sich die herkömmliche Mechanik nicht so ohne Weiteres auf Nanostrukturen anwenden läßt.

Solche Gegenstände sind lediglich tote Materie – meist aus starren Kohlenstoff- oder Siliziumatomen aufgebaut. Sie lösen mit ihrer Winzigkeit Verblüffung aus, doch verblassen sie mit ihrer Leblosigkeit und Einfachheit völlig gegenüber den faszinierenden Welten des lebendigen Nanokosmos.

Die Nanotechnik, um die es hier geht, spielt sich im Reich der bewegten Materie ab. Die muß nicht angefaßt und bewegt werden, sondern kann sich selbst organisieren. In jeder einzelnen unserer Körperzellen beispielsweise sind Proteine am Werk, aktiv in jedem Augenblick, in dem wir uns bewegen, wenn Muskeln ihre Arbeit leisten, wenn der Körper mit Energie versorgt wird und verdaut.

Bausteine sind immer lebendige Proteine, nichts anderes als Eiweiß-Molekülhaufen, die frei herumwabern, deren Atome in ständiger Bewegung sind.

Allerdings sind diese Moleküle keine Legosteine, sie verhalten sich auch nicht so. Sie können nur in einem flüssigen Medium überleben, das genau an ihre Bedingungen angepaßt ist. Außerhalb dieser Umgebung werden sie instabil und fallen auseinander. Die Nanomaschine ist kaputt.

Ähnlich wie Körperzellen: Die funktionieren auch nur in ihrer Flüssigkeitsumgebung.

Das beliebteste Element der Forscher ist das DNA-Molekül. Das Molekül mit der berühmten Doppelhelix gehört zu den am besten erforschten Molekülen; fast alle Eigenschaften sind gut bekannt. Und es läßt sich industriell sehr einfach und preiswert herstellen.

1.3.1 Desoxyribonucleic Acid

Das Wort DNA stammt von dem englischen Wort »Desoxyribonucleic Acid« und bezeichnet ein Molekül, das die Erbsubstanz von fast allen Lebewesen enthält. Es ist chemisch eine polymere Verbindung, die aus Desoxyribonukleotiden aufgebaut ist. Die Nukleotide bestehen jeweils aus einer organischen Base, einem Zuckermolekül und einem Phosphorsäurerest.

Ein DNA-Molekül besteht in der Regel aus zwei Polynukleotidsträngen, die schraubig umeinander gewunden (Doppelhelix) und durch Wasserstoffbrücken zwischen den Basen miteinander verbunden sind. Sie können linear oder ringförmig angeordnet sein. Ihre Größe kann erheblich variieren. So enthält das Genom des Hepatitis-B-Virus nur etwa 3 200 Basenpaare, das größte menschliche Chromosom 1 dagegen etwa 260 Mio.

(Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2008)

2. Die Physik der Nukleinsäuren

Friedrich Simmel ist Professor für experimentelle Physik an der Technischen Universität in München und koordiniert zugleich das Excellence Cluster »Nanosystem Initiative München« der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Seitdem in den Vereinigten Staaten die ersten frappierenden Fortschritte gemacht wurden, dämmerte auch den Forschungsförderungsinstanzen hierzulande, daß sich dahinter womöglich eine sehr zukunftsträchtige Angelegenheit verbirgt.

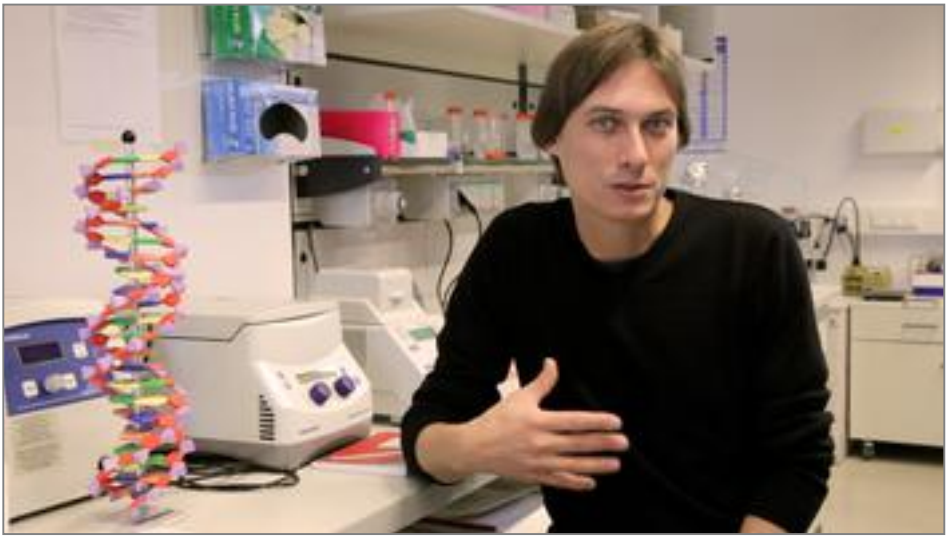

Abb. 2 Friedrich Simmel untersucht die Physik der Nukleinsäuren

Dieser Technologie wird heute ein ähnliches Potential zugeschrieben wie seinerzeit in den Anfängen der Computertechnologie.

Jetzt fließen Forschungsgelder, ein neues modernes Forschungszentrum in München wurde gebaut, Lehrstühle eingerichtet und deutsche Wissenschaftler kommen tatsächlich aus den Staaten zurück und leiten Arbeitsgruppen oder »Labs«. Mittlerweile haben sich dort erstaunliche Forschungsaktivitäten entwickelt, die auch international anerkannt und gelobt werden.

Friedrich Simmel zum Beispiel, der früher in den berühmten Bell Labs in den Vereinigten Staaten forschte, untersucht an der TU München die Physik der Nukleinsäuren und ihre Anwendungen in der Bionanotechnologie. In seinem Chemielabor zeigt er auf ein großes Modell des DNA-Moleküls.

»Diese Doppelhelix hat Eigenschaften, die man sehr gut kennt. Es gibt auch in der Chemie Bestrebungen, molekulare Maschinen herzustellen. Der Unterschied hier ist, daß die DNA ein ganz spezielles Baumaterial ist, das einem eine sehr große Designfreiheit gibt. Aufgrund der Abmessungen der DNA sind Nanomaschinen möglich, die auch in einem anderen Skalenbereich zuhause sind.«

Seine Vision ist ein sich selbst organisierendes Molekularsystem, das sogar auf Einflüsse seiner Umgebung reagieren können soll. Grundlage sind die berühmten vier Bausteine, aus denen das DNA-Molekül zusammengesetzt ist: Adenin, Thymin, Cytosin und Guanin oder kurz: A, T, C und G.

Ein Durchbruch geschah vor vierzehn Jahren, als die ersten künstlichen Strukturen aus Biomolekülen geschaffen werden konnten, die sich tatsächlich auch bewegten oder zumindest so gewirkt haben. »Die DNA-Nanotechnologie ist natürlich ein biss-

chen älter«, erzählt er weiter. »Sie ist Anfang der achtziger Jahre entstanden mit ersten Vorschlägen von Nadrian Seeman. Dessen Idee war, künstliche Strukturen herzustellen aus ein paar DNA.«

2.0.1 Nadrian Seeman

Der amerikanische Biochemiker Nadrian Seeman war einer der wichtigsten Pioniere der neuen DNA-Nanotechnologie. Er entwickelte erste Konzepte und Visionen für eine Nanotechnologie, die aus DNA-Proteinen bestehen sollte.

Er stellte bereits vor 30 Jahren mit einem Würfel aus DNA-Molekülen das erste dreidimensionale Nanoobjekt her und entwickelte Methoden, wie sich die vier Basenpaare der DNA zu ganz neuen Strukturen zusammensetzen lassen.

Friedrich Simmel sagt: »Es gibt zwar auch in der Chemie Bestrebungen, molekulare Maschinen herzustellen. Doch der Unterschied zu den Nano-Physikern ist der, daß die DNA ein ganz besonderes Baumaterial darstellt, das den Konstrukteuren eine sehr große Freiheit in der Konstruktion bietet. Aufgrund der Abmessungen der DNA sind Nanomaschinen möglich, die auch in einem anderen Skalenbereich zuhause sind.«

Die Begeisterung der Forscher ist verständlich. DNA-Moleküle lassen sich heute so zahlreich und preisgünstig herstellen, erzählt Professor Simmel, daß kein Mangel an Material für die Forschungsarbeiten herrscht. Ob DNA auch in Zukunft der ideale Baustoff für Nanomaschinen sein wird, weiß er nicht. Aber im Augenblick ist er der Beste, um neue Ideen auszuprobieren.