

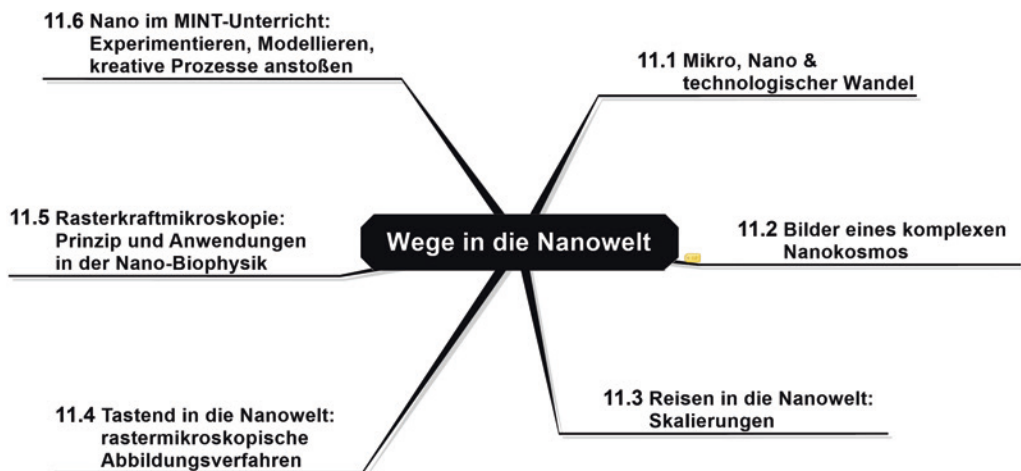
Wege in die Nanowelt: Skalierungs- und Struktur- prinzipien, Werkzeuge der Erkenntnisgewinnung, Modelle und Experimente

Manfred Euler

- 11.1 Mikro, Nano und technologischer Wandel – 328**
- 11.2 Bilder eines komplexen Nanokosmos – 329**
- 11.3 Reisen in die Nanowelt: Skalierungen – 332**
 - 11.3.1 Hören in der Zwergenwelt – 332
 - 11.3.2 Augen für die Zwergenwelt – 334
- 11.4 Tastend in die Nanowelt: rastermikroskopische Abbildungsverfahren – 335**
 - 11.4.1 Die Blackbox erkunden und modellieren: Bohrs Spazierstock als Werkzeug der Erkenntnisgewinnung – 335
 - 11.4.2 Rastertunnelmikroskopie: Prinzip und Nahfeldabbildung im akustischen Modell – 337
 - 11.4.3 Computergestützte Abtastung und Visualisierung von Messdaten – 339
 - 11.4.4 Der Sound der Nanowelt: Ein klassisches Modell des Quantenpferchs – 341
- 11.5 Rasterkraftmikroskopie: Prinzip und Anwendungen in der Nano-Biophysik – 344**
 - 11.5.1 Funktionsmodelle der Rasterkraftmikroskopie für den Unterricht – 344

- 11.5.2 Kraftspektroskopie an Proteinen: komplexe Verwandlungen begreifen – 346
- 11.5.3 Strukturbildung bei Gummibändern: Kraftspektroskopie in Aktion – 348
- 11.5.4 Nanomechanik in Genetik und Epigenetik: Die Entfaltung von Komplexität und ihre Steuerung – 349
- 11.5.5 Nano-Prozesse hören: Das Ohr als natürliches Nanosensorsystem – 353
- 11.6 Nano im MINT-Unterricht: Experimentieren, Modellieren, kreative Prozesse anstoßen – 355**
 - Literatur – 358**

Nanotechnologie gilt als die Schlüsseldisziplin des 21. Jahrhunderts. Das Querschnittsfeld baut auf Grundlagenwissen vor allem aus Physik, Chemie und Biologie auf und erschließt mit geeigneten Werkzeugen vielfältige neue technologische Anwendungsfelder. Ein grundlegendes Verstehen der beteiligten Strukturprinzipien wird durch die Komplexität und Andersartigkeit der Nanowelt erschwert. Viele der vertrauten Vorstellungen der klassischen Physik, die sich in unserer Alltagswelt bewährt haben, versagen. Dennoch ist es möglich, an diese Erfahrungen anzuknüpfen, um die wesentlichen Konzepte begreifbar zu machen. Die im Beitrag skizzierten Wege in die Nanowelt nutzen geeignete Transformationen und Korrespondenzen und veranschaulichen relevante Methoden und Funktionsprinzipien durch Modellexperimente und Analogien (■ Abb. 11.1). Die Reflexion der Modelle vor dem jeweiligen fachlichen Hintergrund unterstützt die Lernenden dabei, die epistemische Distanz zu Nanosystemen zu vermindern und ihre Besonderheiten zu erschließen. Die ausgewählten Beispiele fokussieren auf Aspekte der Nanophysik sowie der Nanobiophysik. In Bezug auf die Erfüllung von Bildungsstandards hat die Behandlung von Nanothemen im Unterricht das Potenzial, grundlegende und weitgehend authentische Einblicke in naturwissenschaftliche ebenso wie in technische Arbeitsweisen zu vermitteln, um die bestehenden Gemeinsamkeiten, aber auch die Unterschiede zu verdeutlichen. Dies ist vor allem im Hinblick auf Entscheidungsprozesse zur beruflichen Orientierung der Jugendlichen wesentlich.



■ Abb. 11.1 Übersicht über die Teilkapitel

11.1 Mikro, Nano und technologischer Wandel

Nanowissenschaft und Nanotechnologie: Charakterisierung, Modellierung, Herstellung und Anwendung von atomaren und molekularen Systemen in der Größenordnung von Nanometern

11



Querschnittsdisziplin
Nanowissenschaft und
Anwendungen

Anders als bei den großen technologischen Revolutionen der Vergangenheit sind es heute vor allem die kreativen Ideen im Kleinen, die bedeutsame Innovationen vorantreiben. Mit Techniken der Mikrostrukturierung lassen sich Systeme im Mikrometerbereich mit vielfältigen elektronischen, mechanischen, optischen oder fluidischen Funktionen schaffen. In der Nanotechnologie erreicht die Miniaturisierung ihre molekulare und atomare Grenze. Während Mikrosysteme noch weitgehend analog zu geeignet verkleinerten klassischen Makrosystemen arbeiten, kommt es auf der Nanometerskala vor allem aufgrund quantenmechanischer Effekte zu Eigenschaften, die neuartige technologische Möglichkeiten eröffnen.

Nanowissenschaft und Nanotechnologie gelten als die Schlüsseldisziplinen des 21. Jahrhunderts. Als typisches Querschnittsfeld baut dieser Bereich auf Grundlagenwissen vor allem aus Physik, Chemie und Biologie auf und erschließt mit geeigneten Werkzeugen und Verfahren vielfältige technologische Anwendungsfelder. Die Erwartungen sind hoch: Mit Erkenntnissen aus der Nanowelt lassen sich viele bestehende Technologien verbessern und verlässlicher, effizienter und ressourcenschonender gestalten. In der Computertechnik verspricht man sich von der Verkleinerung in den Nanobereich und der Nutzung von Quanteneffekten einen gigantischen Sprung der Rechenleistung, der weitreichende Möglichkeiten vor allem im Bereich der Vernetzung und der künstlichen Intelligenz eröffnet. Es ist bereits jetzt absehbar, dass mit neuen Quantentechnologien abhörsichere Kommunikationsnetzwerke aufgebaut werden können. In den Lebenswissenschaften ermöglichen Nanowerkzeuge ein besseres Verständnis komplexer biologischer Prozesse. Das Lernen von der Natur erreicht auf der Ebene von Nanomaschinen und -systemen eine neue Qualität. Es wird die Biotechnologie und die Medizin verändern, aber auch zu neuen Entwicklungen in ganz anderen Bereichen führen, etwa zu biologisch inspirierten Materialien mit intelligenten, adaptiven Eigenschaften.

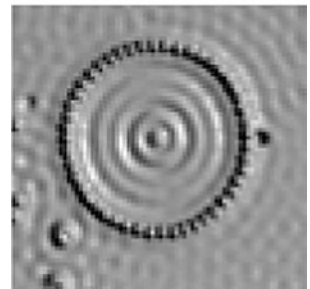
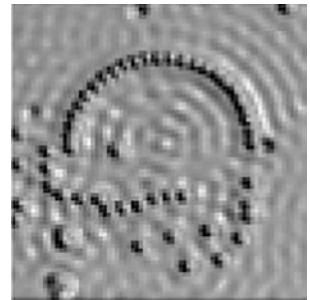
All diese beispielhaften Entwicklungen bergen neben faszinierenden Potenzialen auch Risiken. Die Nanotechnologie wird unsere Lebenswelt ebenso verändern, wie es derzeit durch die Entwicklungen in der Informations- und Kommunikationstechnologie bereits geschieht. Der aufgeschlossene, mündige, wissenschaftlich-technisch gebildete Bürger ist gefragt, der die Chancen von Innovationen nutzt und ihre Risiken abwägt. Dementsprechend bestehen große Herausforderungen an das schulische sowie das lebenslange Lernen.

Strukturen und Prozesse auf der Nanometerskala sind nicht unserer unmittelbaren Wahrnehmung und Anschauung zugänglich. Ein grundlegendes Verstehen der beteiligten Strukturprinzipien wird durch die Komplexität und Andersartigkeit der Nanowelt erschwert. Viele der vertrauten Vorstellungen der klassischen Physik, die sich in unserer Alltagswelt bewährt haben, versagen. Dennoch ist es möglich, an Erfahrungen aus der klassischen Physik anzuknüpfen, um die wesentlichen Konzepte begreifbar zu machen. Die im Folgenden skizzierten Wege in die Nanowelt nutzen geeignete Transformationen und Korrespondenzen und veranschaulichen relevante Methoden und Funktionsprinzipien über Modellexperimente und Analogien. Die Reflexion der Modelle vor dem jeweiligen fachlichen Hintergrund unterstützt die Lernenden dabei, die epistemische Distanz zu Nanosystemen zu vermindern und ihre Besonderheiten zu erschließen. Die Beispiele fokussieren auf Aspekte der Nanophysik sowie der Nanobiophysik.

11.2 Bilder eines komplexen Nanokosmos

Atome galten noch zu Beginn des letzten Jahrhunderts als hypothetische Gebilde. Erst Einsteins Deutung der Brown'schen Molekularbewegung lieferte einen indirekten Nachweis ihrer Existenz: Das unter dem Mikroskop sichtbare Zittern größerer Teilchen einer Suspension resultiert aus der unregelmäßigen Folge von Stößen mit erheblich kleineren Atomen, die sich in heftiger thermischer Bewegung befinden. Heute macht das Rastertunnelmikroskop (STM) Materieteilchen sichtbar. Es erlaubt sogar, individuelle Atome zu positionieren (Eigler und Schweizer 1990). Der sog. Quantenpferch, bestehend aus einer kreisförmigen Anordnung von Fe-Atomen auf einer Cu-Oberfläche, zeigt ein so hergestelltes Nanosystem (Crommie et al. 1993). Diese und ähnliche Bilder haben in viele Lehrbücher Eingang gehalten. Doch was genau zeigen sie? Sieht man tatsächlich Atome als „Materiekumpen“? Sind Elektronen etwa wellenartig verschmiert, wie es das Bild des Quantenpferchs bei oberflächlicher Betrachtung zu suggerieren scheint?

Die Erfindung des STM kann als die eigentliche Geburtsstunde der experimentellen Nanowissenschaft gelten (Gerber und Lang 2006). Bildgebende rastermikroskopische Verfahren haben die Fenster zur Nanowelt weit geöffnet. Mit der Entwicklung weiterer Abbildungs- und Manipulationstechniken vollzieht sich eine rasante Entwicklung des Gebiets. Die damit einhergehende Visualisierung eines faszinierend vielfältigen, wandlungsfähigen, kreativen Nanokosmos unterstreicht, wie sehr unsere Fähigkeit, Komplexes und Abstraktes zu verstehen und für Anwendungen zu erschließen, mit Bildern und Verankerungen in der konkreten



Atome werden im Rastertunnelmikroskop (STM) sichtbar und begreifbar: Aufbau einer kreisförmigen Struktur von Fe-Atomen auf einem Cu-Kristall (Eigler, IBM). Diese als *Quantum Corral* (Quantenpferch) bezeichnete Struktur demonstriert die Möglichkeit des Designs von Nanosystemen Atom für Atom

Erfahrungswelt verbunden ist (■ Abb. 11.2). Auch hier bestätigt sich, dass es keine Einsicht ohne innere Bilder gibt.

Bilder und ihre dynamischen Wandlungsprozesse spielen eine zentrale Rolle bei der Entwicklung mentaler Modelle sowohl im Alltag als auch in der Wissenschaft. In physikalischen Lernprozessen erfüllen sie eine Brückenfunktion zwischen konkreter Anschauung und abstrakten Prinzipien. Sie unterstützen den Transfer von Erfahrungen zwischen der Makro- und der Nanowelt und helfen, neue Ideen zu generieren. Für den Forschungsprozess sind entsprechende kreative Transformationen nicht minder bedeutsam. Freilich stehen Bilder nie isoliert; sie bedürfen einer geeigneten theoretischen Einbettung. Entsprechend basiert das vorliegende didaktische Konzept auf einer reflektierten Nutzung von Metaphern, Bildern und Modellen. Dabei sind die aus der Lehr-Lern-Forschung hinlänglich bekannten Probleme zu berücksichtigen:

- Schüler haben naiv-realistische Vorstellungen von Atomen, die sie als verkleinerte materielle Objekte der klassischen Erfahrungswelt ansehen (z. B. Kügelchen, Mini-Planetensysteme, hybride Welle-Teilchen-Modelle).
- Die Abgrenzung zwischen Modell und Wirklichkeit wird oft nicht eingehalten bzw. ist den Lernenden häufig nicht bewusst.
- Makro-Eigenschaften (Farbe, Gestalt, Festigkeit, Elastizität, Temperatúrausdehnung) werden unreflektiert auf die Teilchen des Modells übertragen.



■ Abb. 11.2 Widerstreitende Bilder. Wie lassen sich die dargestellten Strukturen mit unterschiedlichen Modellen von Atomen in den Köpfen der Lernenden in Einklang bringen?

- Teilchen- und Feldaspekte werden in der Beschreibung und Modellbildung nicht klar unterschieden.
- Der Übergang vom einzelnen Atom oder Molekül zu den emergenten, kollektiven Makro-Eigenschaften des Systems wird im Unterricht und in den Lehrplänen nicht oder nur unzureichend thematisiert. Er stellt das Abstraktionsvermögen der Lernenden vor große Herausforderungen und bedarf daher besonderer Aufmerksamkeit.

Trotz faszinierender Visualisierungen der schönen neuen Nanowelt werden die beschriebenen tief verwurzelten Verständnisprobleme, die aus der konzeptuellen Distanz zur Alltagswelt resultieren, nicht obsolet. Im Gegenteil, die visuelle Prägnanz der bildlichen Darstellung begünstigt eher naiv-realistische Interpretationen.

STM-Bilder sind jedoch keine fotorealistischen Abbildungen einer Szene. Sie sind „verbildlichte Theorie“, die Messwerte grafisch visualisiert. Die erkennbaren Strukturen zeigen eine seltsam hybride Quantenwirklichkeit, die wir mit einem Gemisch von Teilchen- und Wellenmodellen alltagssprachlich beschreiben. Die Fe-Atome des Rings sind als lokalisierte Objekte erkennbar (■ Abb. 11.2). Das Kreiswellenmuster resultiert aus den Welleneigenschaften der auf das Innere des Pferchs quasi eingesperrten Leitungselektronen der Cu-Oberfläche. Die Wellenfunktionen der an den Fe-Atomen gestreuten Elektronen überlagern sich (Fiete und Heller 2003). Die Dichtefunktion ihrer Aufenthaltswahrscheinlichkeit bildet stehende Wellen, die den frequenzabhängigen Eigenschwingungen eines Trommelfells gleichen.

Je nach den Randbedingungen werden verschiedene Aspekte der komplexen Nanowirklichkeit erkennbar. Um die prinzipielle Unmöglichkeit einer naiv-klassischen Verbildlichung der Nanowelt nachvollziehen zu können, bedarf es orientierender Einsichten in die zugrunde liegenden theoretischen Konzepte und experimentellen Methoden. Dies soll im Folgenden anhand verschiedener Analogexperimente skizziert werden, die wichtige Abbildungs- und Messwerkzeuge der Nanowissenschaft mit Low-Cost-Technologien modellieren.

Die verwendeten Modelle unterstützen den Weg „*top-down*“ von den uns vertrauten Dimensionen des Alltags nach unten auf die Nanometer-Skala. Der umgekehrte Weg „*bottom-up*“ schließt sich an. Wie wird aus dem Zusammenwirken kleiner und kleinster Systeme schließlich das Große? Hier werden Konzepte wie Strukturbildung und Selbstorganisation mit Beispielen aus der Biophysik auf der Nanoskala beleuchtet. Sie demonstrieren das Phänomen der Emergenz, das Entstehen neuer Systemeigenschaften abhängig von Parametern wie Größe,

Von oben nach unten und zurück: Modellierung von Bottom-up- und Top-down-Prozessen

Zahl der Komponenten, Art und Stärke der Wechselwirkung, Vernetzungsgrad. Emergenz ist ein universelles Phänomen. Es eröffnet Perspektiven auf weitere Wissensfelder über die Physik hinaus, vor allem auf die Lebenswissenschaften. Leider wird dieser Bereich im derzeitigen naturwissenschaftlichen Unterricht trotz seiner Bedeutung kaum umfassend thematisiert.

11.3 Reisen in die Nanowelt: Skalierungen

Ein vorläufiger, aber trag- und ausbaufähiger Theorierahmen lässt sich über die Reflexion von Verkleinerungen gewinnen, nach dem Motto „Reisen in die Nanowelt: Was ist ähnlich, was anders als in der Alltagswelt?“ Dahinter steht die Idee der Skalierung. Inwieweit sind Erfahrungen der klassisch-makroskopischen Welt durch geeignete Transformationen physikalischer Größen in die Mikrowelt übertragbar? Wie weit lassen sich Systeme verkleinern? Welche Veränderungen sind zu beachten? Wo stößt man auf Grenzen, an denen neue Strukturprinzipien relevant werden?

11.3.1 Hören in der Zwergenwelt

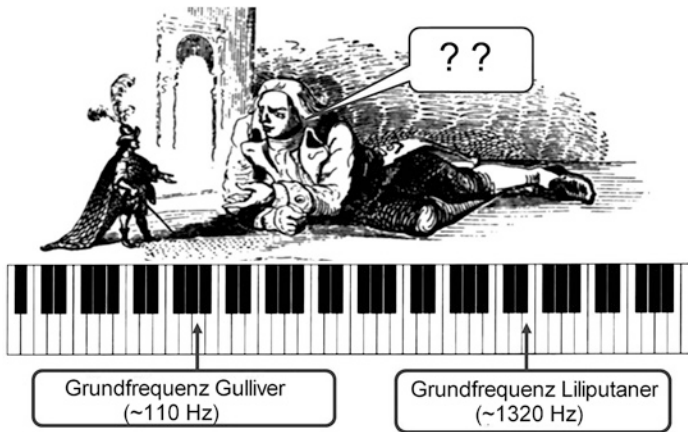
Als Ausgangspunkt der Diskussion bewährt sich eine kritische Analyse des literarischen Urbilds dieser fiktionalen Reisen in eine verkleinerte Mikro- oder Nanowelt (Euler 2001). Im Roman *Gullivers Reisen* wird eine naiv-isometrisch skalierte Zwergenwelt beschrieben, ein um den Faktor 12 maßstäblich verkleinertes Abbild unserer Makro-Welt. Vieles, was sich der Autor ausmalt, ist so nicht möglich. Die Welt der Liliputaner muss aus physikalischen Gründen anders sein. Wir beschränken uns auf die Betrachtung von Hören und Sehen.

Gulliver ist sehr sprachbegabt, und ihm gelingt es, so der Roman, binnen weniger Wochen die Sprache der Liliputaner zu erlernen. Wie würde sich ein solcher Zwerg anhören, wenn man annimmt, dass seine Sprache ebenso wie bei uns produziert und verarbeitet wird (■ Abb. 11.3)? Sprache basiert physikalisch auf den Schwingungen der Stimmbänder und der Resonanz von Hohlräumen. Bei einer Verkleinerung der geometrischen Abmessungen um den Faktor 12 wird die Wellenlänge der Eigenschwingungen proportional verkleinert und ihre Frequenz wird reziprok um den gleichen Faktor vergrößert. Durch die resultierende Verschiebung der Tonhöhen nach oben erwarten wir eine Art Mickymaus-Effekt, wie er bei Trickfilmen oder zu schnell laufenden Schallplatten auftritt.

Die Grundfrequenzen unserer Sprache liegen je nach Geschlecht und Alter im Bereich von ca. 110 Hz bis 250 Hz. Eine Multiplikation der Frequenzen mit dem Liliput-Skalenfaktor 12



Das Urbild für Reisen in eine Zwergenwelt



■ Abb. 11.3 Kann Gulliver die Liliputaner-Sprache verstehen?

entspricht musikalisch einer Transposition, einer Verschiebung des Sprachspektrums um 3,6 Oktaven nach oben. Ob ein Mensch in der Lage ist, Sprache bei einer Tonhöhe von mehr als 1,3 kHz zu verstehen, ist mit der Sprachausgabe von Computern oder Smartphones im Unterricht oder Heimexperiment leicht experimentell zu klären. Mit geeigneter Sound-Software kann man eine Transposition der Sprachsignale unter Beibehaltung der Sprechgeschwindigkeit durchführen. Das frequenzverschobene Signal ist gut hörbar. Man erkennt Sprachmelodie und Rhythmus, doch der Sprachinhalt bleibt unverständlich. Wesentliche Informationen sind bei der Verarbeitung im Gehör verlorengegangen. Offenbar ist unser Gehirn für eine sprachliche Decodierung von Signalen jenseits von 1 kHz nicht ausgelegt. Gulliver hätte keine Chance, die Sprache der Liliputaner zu verarbeiten. Eine schlechte Botschaft für alle mehr oder weniger guten Hollywood-Filme, die mit der Idee von geschrumpften Personen und ihren Abenteuern Kasse machen. Warum genau unser Gehirn mit dem Decodieren von skaliert Sprache überfordert ist, wird im Abschnitt über die Nano-Biophysik des Hörens noch zu klären sein (► Abschn. 11.5.5).

Die reziproke Skalierung von Frequenzen mit den Abmessungen von Strukturen wird in der Nanotechnologie beim Design von Materialien mit kontinuierlich abstimmbaren Farben verwendet. Das Farbspektrum der üblichen Pigmentfarben lässt sich nur durch ihre chemische Zusammensetzung verändern. Kleinste Metall- oder Halbleiterpartikel zeigen jedoch Farbeffekte, die sich abhängig von der Teilchengröße kontinuierlich durchstimmen lassen. Sie beruhen auf der Anregung kollektiver elektronischer Schwingungen (Plasmonen) in den Teilchen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten im Design von Materialien mit „maßgeschneidertem“ Verhalten bei der Emission, Absorption

Nanoteilchen mit
größenabhängiger Farbe

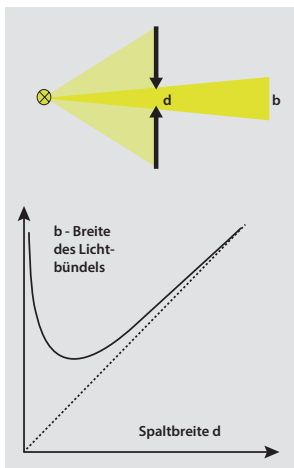
oder Streuung von Licht. Sonnencremes nutzen Nanoteilchen, um die schädliche UV-Strahlung zu absorbieren. Bereits in der Antike hat man durch die Zugabe von Goldsalzen Gläser gefärbt. Heute weiß man, dass die resultierende Farbe von der Größe kolloidaler Goldteilchen in der Glasschmelze abhängt.

11.3.2 Augen für die Zwergenwelt

Die Einsicht, dass bei einer Verkleinerung der Systemabmessungen die relevanten Wellenlängen proportional zu verkleinern sind, leitet zu den Grenzen der optischen Abbildung mit Linsensystemen über. Die Zwerge, so der Roman, sollen aufgrund der Kleinheit ihrer Augen besonders gut sehen können. Da sie über den gleichen Typ von Linsenaugen wie wir verfügen, trifft jedoch das Gegenteil zu. Wegen Beugungseffekten an den verkleinerten Pupillen würden die Liliputaner schlechter sehen, und zwar zwölfmal so unscharf wie wir. Am Beispiel der Skalierung optischer Abbildungssysteme lassen sich Einsichten gewinnen, die auch für den Übergang in die Nanowelt mit ihrer prinzipiellen Andersartigkeit richtungsweisend sind.

Im Alltag kommen wir gut mit der Vorstellung zurecht, dass sich Licht geradlinig ausbreitet. Das Modell „Lichtstrahl“ ist eine mathematische Idealisierung, die davon ausgeht, dass man die Breite von Lichtbündeln theoretisch immer weiter verkleinern kann. In der geometrischen Optik ist die Breite des Lichtbündels proportional zur Breite des Spalts, der das Bündel eingrenzt. Die Grenze dieses Modells ist buchstäblich mit den Händen begreifbar. Man schickt dazu das Licht eines Laserpointers durch den Spalt zwischen zwei Fingern oder zwei Rasierklingen, dessen Breite man sukzessive vermindert. Zunächst wird erwartungsgemäß das Bündel schmaler. Mit abnehmender Spaltbreite zeigen sich helle und dunkle Streifen, deren Abstände immer größer werden. Kurz bevor der Spalt sich vollständig schließt, wird das Lichtbündel weit aufgefächert.

Diese im Rahmen der Strahlenoptik unerklärbare Aufweitung wird im Wellenmodell verständlich. Die innere raumzeitliche Struktur des Lichts, sein Wellencharakter im Bereich von einigen hundert Nanometern, führt zu Beugungseffekten, die einer Verkleinerung entgegenwirken. Die Verbreiterung des Lichtbündels durch Beugung ist proportional zur Wellenlänge des Lichts und umgekehrt proportional zur Spaltbreite. Zwei gegenläufige Strukturprinzipien stoßen bei der Skalierung aufeinander und definieren eine minimale Größe im Bereich der Lichtwellenlänge λ . Dies ist auch die Größenordnung von



Die Verkleinerung der Breite eines Lichtbündels stößt durch Beugungseffekte an eine Grenze

Strukturen, die in der gewöhnlichen Lichtmikroskopie gerade noch aufgelöst werden. Nach dem Abbé-Kriterium liegt der minimale Abstand Δx zweier unterscheidbarer Punktquellen bei $\Delta x \approx \lambda/2$ (Novotny 2007).

Abbildungssysteme für die Mikro- bzw. Nanowelt erfordern daher neue Designprinzipien. Die Komplexaugen der Insekten zeichnen den Weg vor. Viele kleine Einzelaugen bilden ein Raster, welches das Sehfeld abtastet. Das Einzelauge arbeitet nach dem Lichtwellenleiterprinzip und koppelt Licht aus einem bestimmten Raumwinkelbereich ein. Damit lassen sich auch Objekte im Nahbereich abbilden, ohne dass – wie bei unseren Augen – die Brennweite der Augenlinse verändert werden muss. Eine ähnliche Idee liegt auch den Abbildungsverfahren im Nanobereich zugrunde. Eine Sonde tastet Nanostrukturen in der unmittelbaren Nachbarschaft ab. Anders als die Linse einer Kamera erfasst sie nicht das optische Fernfeld, sondern das Nahfeld der abzubildenden Objekte, das wie ein Fernsehbild sequenziell Zeile für Zeile durch Verschieben der Sonde abgerastert wird.

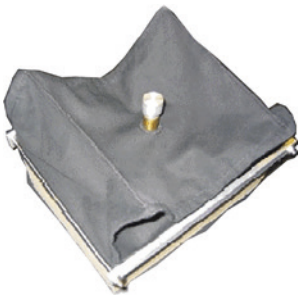
11.4 Tastend in die Nanowelt: raster-mikroskopische Abbildungsverfahren

11.4.1 Die Blackbox erkunden und modellieren: Bohrs Spazierstock als Werkzeug der Erkenntnisgewinnung

Lange vor der Erfindung dieser Verfahren der Rastermikroskopie hat Niels Bohr, einer der Begründer der Quantenphysik, in einer bemerkenswerten Metapher beschrieben, wie wir als makroskopische Wesen uns Modelle der unsichtbaren Nanowelt der Quanten und Atome machen, deren Eigenschaften sich der klassisch geprägten Anschauung weitgehend entziehen. Das Erforschen gleicht dem Vorgehen eines Blinden, der sich mit einem Stock tastend orientiert, um so ein Bild seiner Umgebung zu erstellen. Als Tastwerkzeug kann der Stock auf verschiedene Weise benutzt werden. Wird er fest ergriffen, dann ist er Teil des Beobachter-Systems und verlagert die Kontaktstelle zur Außenwelt in die Spitze. Wird er lose gehalten, dann sind die Bewegungen des Stocks fühlbar. Der feste Modus ermöglicht exakte Lokalisierung; im losen Modus lässt sich der übertragene Impuls erfassen. Während in der klassischen Welt komplementäre Größen wie Ort und Impuls von Teilchen gleichzeitig scharf messbar sind, ist das in der Quantenwelt nicht möglich. Die Spazierstockmetapher illustriert die Freiheit der Wahl der



Ein Blinder ertastet und modelliert die Umgebung. Ein zutreffendes Bild der Erkenntnisgewinnung in der Nanowelt



Nanowelt als Blackbox: Systematisches Ertasten, Visualisieren und Modellieren macht Aspekte der verborgenen Strukturen sichtbar

zu messenden Größen sowie den Aspektcharakter des jeweils erfassten Wirklichkeitsausschnitts (Klein 1963). Für Bohr war diese Metapher mehr als nur ein pädagogisches Instrument. Es verweist auf die Begrenztheit unserer Erkenntnisprozesse der Natur, aus der wir hervorgehen und deren Wesen wir sozusagen von innen heraus zu ergründen suchen. Bohr hat sicher nicht ahnen können, dass das Modell des aktiven Spazierstocks als Werkzeug der Erkenntnisgewinnung eine Blaupause für Bildgebungsverfahren der Nanotechnologie abgibt.

Auch ohne Prinzipien der Quantenphysik zu kennen, ist es mit einem Abtastmodell möglich, wichtige Einsichten in die bildgebenden Verfahren zu gewinnen sowie in die Probleme, Unsichtbares zu visualisieren. Ein Blackbox-Ansatz hat sich für den frühen Einstieg im Unterricht bewährt. Schüler erhalten einen schwarzen Kasten, dessen Innenleben mit einem Tuch verhüllt ist. Ein in der Ebene verschiebbarer Griffel erlaubt es, die im Inneren verborgenen Strukturen auf einer ebenen Oberfläche zu ertasten. Die so über die Griffelsonde als Werkzeug empfundenen Formen sollen dann in ein Bild umgesetzt werden. Dazu bedarf es geeigneter Modellannahmen, die systematisch getestet werden. Die Verschiedenheit der entstehenden Bilder verblüfft. Was man zeichnet, hängt neben dem darstellerischen Geschick auch von der Messmethode ab, z. B. von der Größe und der Form der Griffelspitze, die von Box zu Box variiert. Die Griffelsonde verändert systematisch die Darstellung der verborgenen „wirklichen“ Struktur, die schließlich enthüllt wird, um das Bild mit den nun sichtbaren Gegebenheiten zu vergleichen.

Das Erkunden des Inhalts der Blackbox vermittelt spielerisch den hypothetischen Charakter des naturwissenschaftlichen Arbeitens im Wechselspiel von Theorie und Experiment, von dem Aufstellen von Hypothesen und ihrer experimentellen Prüfung. Anders jedoch als in diesem Modell, das schließlich in eine transparente Whitebox verwandelt wird, die ihren Inhalt preisgibt, lässt sich das Wesen der verborgenen physikalischen Realität nur innerhalb gewisser Grenzen iterativ enthüllen. Was man „sieht“ bzw. interpretiert, hängt von den theoretischen Annahmen sowie von den zur Verfügung stehenden Instrumenten ab.

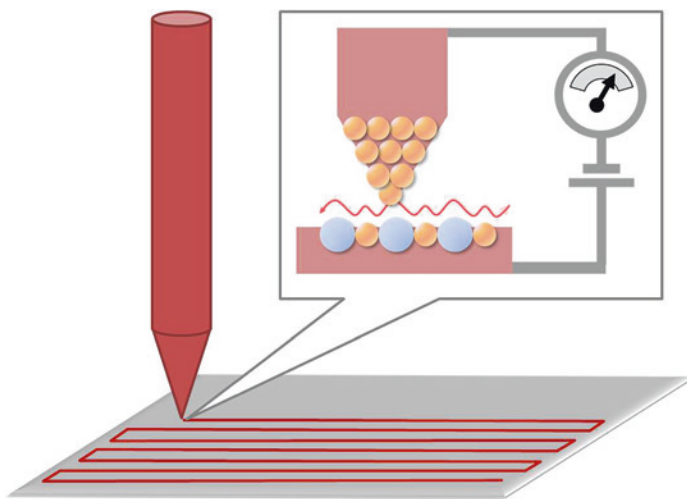
Das Blackbox-Modell bewährt sich im frühen naturwissenschaftlichen Unterricht zur erfahrungsbasierten Einführung in die kritisch-realistischen naturwissenschaftliche Methodik, die sich im Zusammenwirken von Theorie und Experiment entfaltet. Das einfache Modell hat aber auch Schwächen. Atome werden in der Blackbox durch Objekte wie Murmeln oder Tischtennisbälle simuliert. Das mechanische Abtasten der Strukturen leistet rein mechanischen Atomvorstellungen Vorschub. Doch die Methode ist ausbaufähig in Bezug auf die Modellierung von Quanteneffekten. Wie die nachfolgenden Abschnitte ausführen, lassen sich durch Veränderungen der Sonde sowie durch grafische Auswertung

quantenmechanische Phänomene in einem klassischen Bildgebungssystem simulieren. Unter anderem gewinnt man dabei Einsichten in das Prinzip der Nahfeldabbildung. Seine Realisierung im Rastertunnelmikroskop hat die Entwicklung zahlreicher neuer Bildgebungsverfahren auf der Nanometerskala angestoßen.

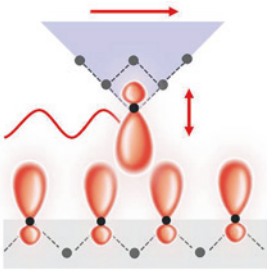
11.4.2 Rastertunnelmikroskopie: Prinzip und Nahfeldabbildung im akustischen Modell

Die rastermikroskopischen Scanning-Verfahren der Nanowissenschaft setzen das Prinzip des aktiv tastenden Spazierstocks auf diverse Weisen um. Je nach Wechselwirkungsmechanismus kommen verschiedenartige Typen von Sonden zum Einsatz. Beim Rastertunnelmikroskop (STM) tastet eine spitzenförmige Sonde, die in den drei Raumrichtungen durch piezokeramische Stellelemente verschiebbar ist, die zu untersuchende Oberfläche zeilenweise ab (■ Abb. 11.4). Die feine Spitze der Sonde endet in einem Einzelatom. Wird zwischen Sonde und Probe eine Spannung angelegt, dann kann bei ausreichender Nähe bereits ohne direkten mechanischen Kontakt ein Strom fließen. Dies ist ein Quanteneffekt, der auf den Welleneigenschaften der Elektronen beruht: Elektronen durchtunneln die Energiebarriere (Binnig et al. 1982).

Der Tunneleffekt lässt sich anschaulich im Wellenbild deuten. Die Wellenfunktionen von Atomen der Sondenspitze und der Probe überlappen zunehmend bei Annäherung. Abhängig vom Grad der Überlappung fließt zwischen besetzten Zuständen der



■ Abb. 11.4 Prinzip des Rastertunnelmikroskops (*Scanning Tunneling Microscope, STM*)



Der Tunnelstrom reagiert auf überlappende elektronische Wahrscheinlichkeitsfelder an der STM-Spitze hier visualisiert durch Orbitalbilder

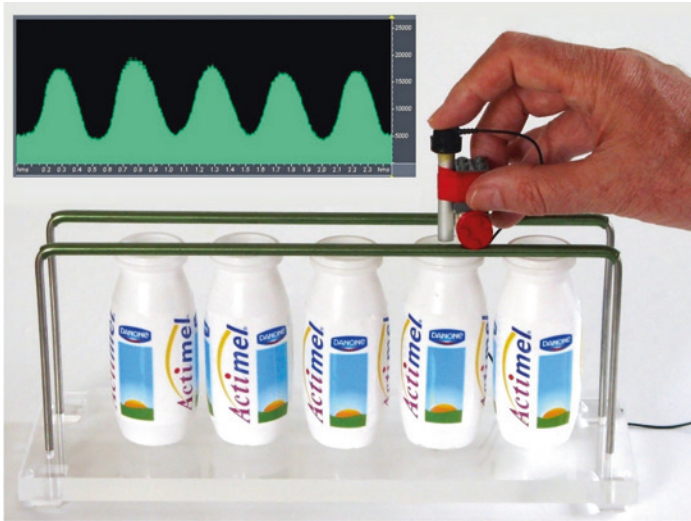
11

Spitze und unbesetzten Zuständen der Probenoberfläche (oder umgekehrt, je nach Polung) ein Strom, dessen Stärke mit Verringerung des Abstandes exponentiell zunimmt.

Analog zum tastenden Stock kann das STM je nach Betriebsart strukturelle oder dynamische Informationen erfassen. Der Topografie-Modus arbeitet mit konstantem Tunnelstrom. Dafür sorgt ein Regelkreis, der den Abstand zwischen Sonde und Oberfläche so anpasst, dass der Strom konstant bleibt. So folgt die Bewegung der Spitze der Oberflächentopografie. Der ortsabhängige Verlauf der Spannung, die den Abstand der Spitze regelt, bildet diese Topografie wie in einer Landkarte ab. Im Spektroskopie-Modus, auf dessen Betrachtung wir uns hier beschränken, wird der Abstand der Sonde zur Probe konstant gehalten. Es werden ortsabhängig die Veränderungen des Tunnelstroms in Abhängigkeit von der angelegten Spannung gemessen. Die Messwerte geben Aufschluss über die energieabhängige Dichte der lokalen elektronischen Zustände an der Oberfläche. Sie werden per Computer in ein Bild umgesetzt.

Trotz des abstrakten Charakters der STM-Abbildungen als „verbildlichte“ Quantentheorie existieren Korrespondenzen zu klassischen Wellenerscheinungen. Analogien zwischen Materie- und klassischen Wellen helfen hier weiter. Das Überlappen der Zustandsdichten zwischen Sonden- und Oberflächenatomen entspricht in der klassischen Welt einer Resonanz. Unser Gehör nutzt Resonanzen auf vielfältige Weisen zum Nachweis von Schallsignalen und zur Orientierung in einer von Wellenphänomenen dominierten akustischen Welt. Ähnlichkeiten zur Ortung von Schallquellen beim Hören erlauben es, die Besonderheiten der STM im Spektroskopie-Modus in Funktionsmodelle umzusetzen, um das Abbildungsprinzip auch ohne tiefere quantentheoretische Kenntnisse begreifbar zu machen.

Die Korrespondenz zwischen Materie- und Schallwellen führt unmittelbar zur Idee der akustischen Nahfeldabbildung analog der STM-Spektroskopie (Euler 2012a). Die akustische Abtastung einer Reihe von Joghurtflaschen in der Abbildung demonstriert das Prinzip (■ Abb. 11.5). Die akustische Sonde besteht aus einer mit einem dünnen Metallrohr verlängerten Ohrhörererkapsel, die für das manuelle Scannen an Lego-Rädern befestigt ist. Nach Abstimmung auf die Resonanzfrequenz der Flaschen ($f_0 \approx 2,4$ kHz) ist es möglich, die Lage der einzelnen Resonatoren mit dem Gehör zu orten. Für Messzwecke lässt sich eine einfache akustische Impedanzsonde herstellen, indem man ein kleines Mikrofon in die Röhrenwand nahe der Öffnung einbaut. Die Abbildung zeigt die mit dem Mikrofoneingang eines Computers gemessenen Signale, wobei die Sonde mit konstanter Geschwindigkeit über die Flaschen gefahren wird. Das



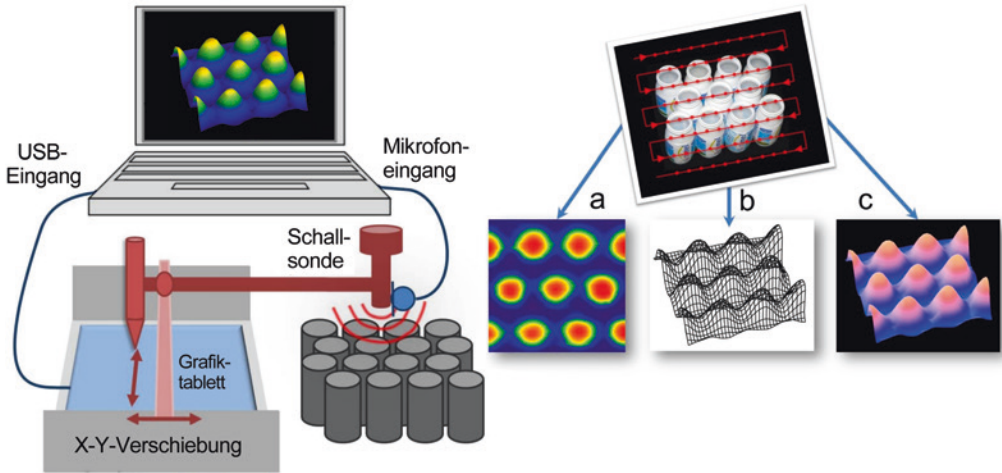
■ **Abb. 11.5** Demonstrationsmodell zur eindimensionalen Abtastung der akustischen Resonanz von Joghurtflaschen

Resonanzmaximum zeigt die Position der Flaschen an. Dies entspricht dem Lokalisieren einzelner Atome mit der STM-Spitze.

Die akustischen Scans zeigen Strukturen im cm-Bereich, die wesentlich kleiner als die verwendete Wellenlänge sind ($\lambda \approx 15$ cm). Bei konventionellen optischen Abbildungen mit Linsensystemen ist das aufgrund der oben beschriebenen Beugungseffekte nicht möglich. Das einfache akustische Modell demonstriert die Besonderheit der Nahfeldabbildung: Das Nahfeld des Schalls an der Sondenspitze ist für die Resonanzanregung verantwortlich. Es grenzt die Wechselwirkung auf einen Bruchteil der Wellenlänge ein. Der Bildaufbau über zeilenweises Abtasten gestattet die Auflösung von Details weit unterhalb der Beugungsgrenze. Das Experiment ist als Smartphone-Applikation für Schülerprojekte geeignet (Thees et al. [2017](#)).

11.4.3 Computergestützte Abtastung und Visualisierung von Messdaten

Das eindimensionale Modell lässt sich unter Verwendung eines Grafiktablets zu einem computergestützten Abbildungssystem erweitern, das die Daten der zeilenweisen 2D-Abtastung speichert und grafisch ausgibt (■ [Abb. 11.6](#)). Die Abbildung zeigt schematisch den Aufbau sowie die Wandlung der Datenmatrix in verschiedene visuelle Darstellungen. Die Grafikausgabe von verbreiteten Programmen für Tabellenkalkulation wie Excel oder

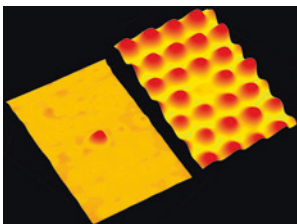


■ **Abb. 11.6** Akustische Abbildungen von Joghurtflaschen und verschiedene visuelle Präsentationen der Messdaten: **a** Kontur-Plot; **b** Gitter-Plot; **c** 3D-Darstellung

SigmaPlot kann dafür verwendet werden. Der akustische Scan einer hexagonalen Anordnung von Joghurtflaschen bestätigt die nahezu perfekte Übereinstimmung mit STM-Bildern. Ein unvoreingenommener Beobachter kann nicht entscheiden, ob Flaschen oder Atome gezeigt werden.

Im Gegensatz zur Nanowelt ist es möglich, das Bild mit dem realen System zu vergleichen. Die sichtbaren Hügel stehen nicht für die topografische Kontur von festen materiellen Objekten; sie stellen die Stärke der resonanten Antworten dynamischer akustischer Systeme dar. Die Maxima befinden sich im Zentrum der Flaschenöffnung, wo die Sonde am besten an die Resonanz ankoppelt. Das Modell demonstriert die Unzulänglichkeit einer naiv-realistischen, stofflichen Interpretation der Darstellung. Die atomaren Strukturen in STM-Bildern zeigen keine statischen Materiekuppen, sondern dynamische Systeme, die sich durch elektronische Wechselwirkungsprozesse mit der Sonde bemerkbar machen.

Das akustische Modell ermöglicht auch die Simulation von Fremdatomen. Die in der Randspalte gezeigte Fehlstelle kommt nicht durch eine fehlende, sondern durch eine teilweise mit Wasser gefüllte Flasche zustande. Die Füllung verändert die Eigenfrequenz. Die so verstimmte Flasche bleibt verborgen. Eine Anpassung der Sondenfrequenz macht diese Fehlstelle selektiv sichtbar. Die durch das Füllen verschobenen akustischen Resonanzen entsprechen der elektronischen Signatur eines Fremdatoms. Das Abstimmen der Frequenz entspricht der Wahl einer geeigneten Tunnelspannung in der STM-Spektroskopie,



Simulation eines Gitters mit Fremdatom durch eine teilweise mit Wasser gefüllte Joghurtflasche

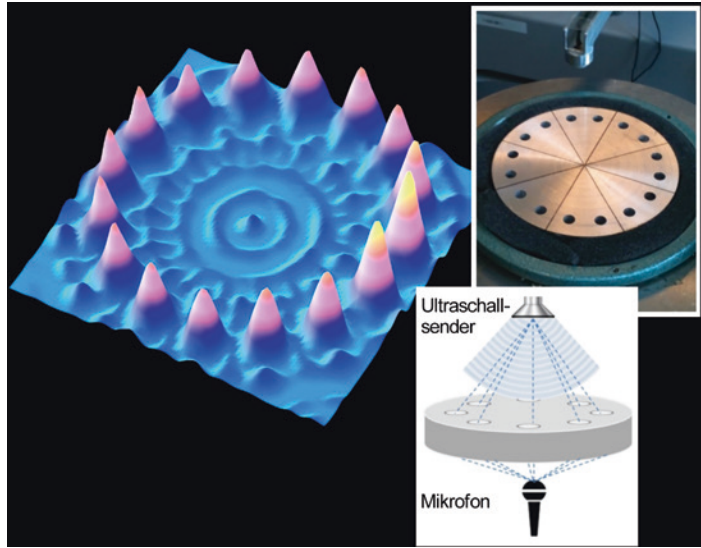
um energieselektiv elektronische Zustände einer bestimmten Atomsorte nachzuweisen. Auf diese Weise werden die Fe-Atome im Quantenpferch selektiv dargestellt, während die Cu-Atome des Substrats im Bild unsichtbar bleiben.

11.4.4 Der Sound der Nanowelt: Ein klassisches Modell des Quantenpferchs

Die akustische Analogie ist tragfähig, und die Methode der akustischen Nahfeldabbildung lässt sich für fortgeschrittene Überlegungen und Experimente erweitern. Die Ähnlichkeiten von Schall- und Tunnelsonde beruhen auf der Analogie zwischen zeitunabhängiger Schrödinger-Gleichung und akustischer Wellengleichung. Wie ein STM im Spektroskopie-Modus arbeiten die akustischen Scans mit festem Sondenabstand. Der wählbaren akustischen Frequenz entspricht die Energie der Elektronen, die durch die Tunnelspannung gewählt wird. Der differenzielle Tunnelstrom (dI/dV) bei fester Tunnelspannung ist ein Maß für die lokale Zustandsdichte. Die Messung entspricht einer lokalen Impedanzmessung für Elektronenwellen bei vorgegebener Energie (Barr et al. 2010). Entsprechend erfasst die Schallsonde die lokale akustische Impedanz bei vorgegebener Frequenz. Sie speist einen konstanten Schallfluss ein und registriert die lokalen Veränderungen im Schalldruck. Analog zur Elektrik ist die gemessene Schallleistung bei konstantem akustischem Strom (Schallfluss) proportional zum Widerstand (Betrag der akustischen Impedanz). Mittels dieser perfekten Analogie gelingt es sogar, den Quantenpferch akustisch zu simulieren.

Das akustische Modell muss erweitert werden, um die Streuung von Leitungselektronen in Oberflächenzuständen zu simulieren. Um die Abmessungen klein zu halten, erfolgt die Abbildung mit Ultraschall. Ein Schallgeber ($f=36$ kHz) scannt die Struktur ab. Sie besteht aus einer Aluminiumplatte mit kreisförmig angeordneten Bohrungen. Dahinter befindet sich im Abstand von 2 cm eine weitere Platte. Der Kanal im Zwischenraum führt die Schallwellen und imitiert die Welleneigenschaften von Leitungselektronen in Oberflächenzuständen. Im Zentrum der Platte ist ein Mikrofon eingebaut, das den übertragenen Schall registriert (■ Abb. 11.7). Anders als zuvor wird eine Transmissionsmessung vorgenommen.

Die akustische Abtastung zeigt neben den ringförmig angeordneten Bohrungen ein Muster stehender, teils konzentrischer Wellen. Die Bohrungen stehen für die Fe-Atome des Quantenpferchs, die Leitungselektronen der Oberfläche streuen.



■ **Abb. 11.7** Der akustische Pferch, ein klassisches Analogon des Quantenpferchs (links). Aufbau mit Ultraschallsender und -empfänger sowie schematische Ausbreitungspfade (rechts)

Das Interferenzmuster im Inneren kommt dadurch zustande, dass die Schallwellen auf verschiedenen Wegen über die einzelnen Bohrungen zum Mikrofon gelangen. Die jeweiligen Einzelbeiträge überlagern sich, und es kommt je nach Phasenlage zur Verstärkung oder Auslöschung. Die akustische Transmissionsmessung bildet die mehrfachen Streuprozesse der Leitungselektronen nach, die zum Interferenzmuster im Inneren des Pferchs führen. In dieser akustischen Analogie verlieren die STM-Bilder vollends ihre Seltsamkeit, denn die dargestellte Nanowirklichkeit mit ihrem hybriden Gemenge aus teilchen- und wellenartigen Mustern lässt sich in einem völlig transparenten makroskopischen System nachbilden. Die Nutzung von Analogien, verbunden mit ausreichendem theoretischem Hintergrund, hilft, die Strukturen des Nanosystems adäquat zu interpretieren. Es gibt zahlreiche Analogien zwischen klassischen und Quantensystemen (vgl. Dragoman und Dragoman 2004). Diese sind zumeist konzeptuell anspruchsvoll und kaum für den Einstieg geeignet. Die hier verwendeten Korrespondenzen zwischen klassischen Wellen und Materiewellen sind dagegen noch vergleichsweise einfach.

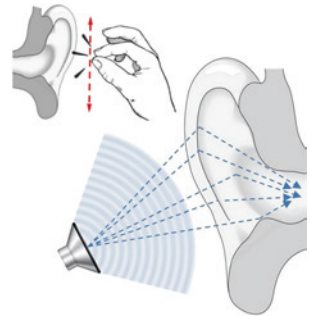
Mehr als eine Einbahnstraße: die produktive Rolle von Analogien für das Lernen und Verstehen

Für Lernen und Verstehen ist entscheidend, dass die Analogie nicht nur den epistemischen Graben auf dem Weg von der Alltags- zur Quantenwelt überbrückt, sondern auch in der umgekehrten Richtung tragfähig ist. Die Funktionsweise des STM, Atome im Nahfeld der Sonde aufgrund von Wellenphänomenen aufzuspüren und per Spektroskopie deren innere

Dynamik zu analysieren, besitzt ein Pendant in der akustischen Wahrnehmung. Unser Gehör kann im Nahfeld Objekte orten, wie ein einfaches Tracking-Experiment zur Verfolgung einer bewegten Schallquelle zeigt. Man verschließe ein Ohr mit der flachen Hand, erzeuge durch Reiben von Daumen und Zeigefinger der anderen Hand ein Geräusch in der Nähe des gegenüberliegenden Ohrs. Bereits mit nur einem Ohr ist es möglich, die Geräuschquelle zu lokalisieren und ihrem Weg akustisch zu folgen. Man benötigt also nicht immer zwei Ohren zum Richtungs-hören!

Die Übertragungscharakteristik des Außenohrs ermöglicht diese Lokalisierungsleistung mit nur einem Ohr. Schallwellen werden an der komplexen Topografie der Ohrmuschel gestreut und gelangen auf verschiedenen Pfaden zum Trommelfell. Je nach Gangunterschied überlagern sich die einzelnen Beiträge konstruktiv oder destruktiv. Abhängig von der Einfallsrichtung des Signals werden bestimmte Frequenzkomponenten ausgeblendet, und es verändert sich die Klangfarbe. Wir haben per Erfahrung gelernt, Änderungen von Lautstärke und Klangfarbe einer spektral reichen Schallquelle für deren Lokalisation zu nutzen. Allerdings ist das Hörsystem evolutionär so angelegt, dass wir diese Analyse unbewusst ausführen. Insofern fördern die Experimente und die Analogie zur akustischen Impedanz-Spektroskopie nicht nur Erkenntnisse über die Nanowelt, sondern auch über die vertraute Alltagswelt. Das Prinzip der Nahfeldabbildung via Wellen ist Teil unseres evolutionären Erbes.

Die Präsentation von Aspekten der Quantenwirklichkeit in STM-Bildern hat zu zahlreichen Diskussionen und philosophischen Kontroversen über deren Wesen geführt, das über visuelle Erfahrungen und gewöhnliche Wahrnehmungsprozesse hinauszugehen scheint. Die Darstellungen werden daher gerne mit Werken abstrakter Kunst verglichen (Tumey 2009). Ähnlich dem Kubismus scheinen sie unterschiedliche Perspektiven auf ein Objekt in einem einzigen Bild zu vereinen. Die vorgestellten Analogien zeigen, dass die STM-Bildgebung durchaus im Einklang mit unseren Wahrnehmungsprozessen steht, allerdings nicht mit Seh-, sondern mit Hörerfahrungen. Fasst man Hören als ein inneres Sehen von raum-zeitlichen Mustern auf, dann erschließt sich, dass visuelle Präsentationen von STM-Daten mehr mit Hörbildern gemeinsam haben als mit gewöhnlichen Abbildungen. Anstatt vom Sehen der Atome im STM zu sprechen, erscheint es daher angemessener, an eine akustische Lokalisierung der Materieteilchen und an das Hineinhorchen in deren innere Dynamik zu denken (Euler 2013). Die Vorstellung, dass STM-Bilder unhörbare elektronische Klänge der Nanowelt visualisieren, mag ungewöhnlich erscheinen, doch sie trifft den Kern.



Die akustische Verfolgung einer Schallquelle im Nahfeld. Mehrfachstreuungsprozesse an der Ohrmuschel verändern die Klangfarbe

Kontroversen über das Wesen von STM-Bildern

11.5 Rasterkraftmikroskopie: Prinzip und Anwendungen in der Nano-Biophysik

11.5.1 Funktionsmodelle der Rasterkraftmikroskopie für den Unterricht

Bringt man die Abtastspitze an einem elastischen Mikro-Balken an, so erhält man die Sonde eines Rasterkraftmikroskops (*Atomic Force Microscope*, AFM; Binnig et al. 1986). Es kann Kräfte über die optische Erfassung der Biegung des Balkens bis in den Bereich von Pikonewton (10^{-12} N) messen. Während der Betrieb des STM saubere Oberflächen und möglichst gutes Vakuum erfordert, ist das AFM weniger anspruchsvoll. Es kann daher auch zur Untersuchung biologischen Materials verwendet werden.

Die Konzeption von Funktionsmodellen für den Unterricht gestaltet sich einfacher als beim STM, denn die Arbeitsweise des AFM ist noch nahe an der klassischen Physik. Anders als der quantenmechanische Tunneleffekt ist das Prinzip der Kraftmessung über elastische Verformung von Körpern den Schülern aus dem Anfangsunterricht bekannt. Exemplarisch sei ein einfach nachzubauendes Modell für den Unterricht oder für Schülerprojekte gezeigt (■ Abb. 11.8; Planinsic und Kovac 2008). Komponenten sind Lego-Steine, Plastilin, Blattfeder und Laserpointer. Die Abtastspitze bildet ein kleiner Magnet, der die Wechselwirkungskräfte zwischen Spitze und Probe simuliert.



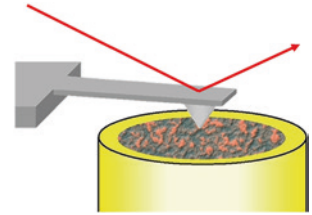
■ Abb. 11.8 Modell eines Rasterkraftmikroskops für den Unterricht (Planinsic und Kovac 2008)

Das sequenzielle Abtasten einer Reihe von magnetischen oder unmagnetischen Objekten führt zu einer Änderung der Blattfederbiegung, die über den Lichtzeiger verstärkt und aufgezeichnet wird.

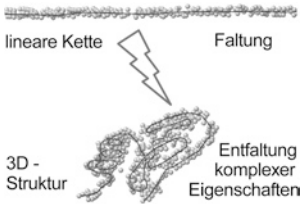
Wie Bohrs Spazierstock und wie ein reales AFM kann auch das Modell auf verschiedene Weisen betrieben werden. Im statischen Kontakt-Modus wird die Probe Zeile für Zeile bei festgehaltenem Abstand abgetastet. Die Verbiegung des Balkens ist ein Maß für die Kräfte zwischen Spitze und Probe. Im dynamischen Schwingungs- oder auch Tapping-Modus wird der Balken in Schwingungen versetzt, und es werden Veränderungen des Schwingungsverhaltens durch lokale Kräfte analysiert. Im realen AFM geschieht der Schwingungsantrieb piezoelektrisch, im Modell erfolgt er elektromagnetisch. Eine Spule, verbunden mit einem Funktionsgenerator, erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, das die Blattfeder antreibt. Die Wechselwirkung der Spitze mit Strukturen in der unmittelbaren Nähe verändert Amplitude und Phase der Schwingung.

Neben der Abtastung der zweidimensionalen Kraftverteilung an Oberflächen erlaubt die AFM-Sonde auch Kraft-Dehnungs-Messungen an Einzelmolekülen. Diese Betriebsart heißt Kraftspektroskopie. Sie liefert wichtige Informationen zur Molekülmechanik und zum Entstehen neuer Eigenschaften von komplexen Molekülen aus dem Zusammenwirken der molekularen Bausteine und den Randbedingungen der Umgebung. Eine Einsicht in die Entfaltung komplexer Funktionen auf molekularer Ebene ist für ein tieferes Verständnis biologischer Prozesse unerlässlich. Daher wird exemplarisch die Kraftspektroskopie von Biomolekülen diskutiert und im Modellexperiment mit Alltagserfahrungen verbunden.

Die Ursache-Wirkungsbeziehung, die dem AFM zugrunde liegt, ist tief in unserer klassischen Erfahrungswelt als kausales mentales Schema verwurzelt: Je mehr Kraft wir anwenden, desto größer ist die resultierende Wirkung. Angenähert besteht für kleine Verformungen ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Dehnung, ausgedrückt durch das vertraute Hooke'sche Gesetz. Dieses wird im Unterricht im Kontext der Längenänderung von Schraubenfedern diskutiert (bei genauerem Hinsehen ein Experiment, das auf Torsionselastizität beruht). Das elastische Verhalten von Biomolekülen wie Proteinen oder DNA-Fäden unterscheidet sich jedoch grundlegend von dem einer elastischen Schraubenfeder und verweist auf Prozesse, die im Physikunterricht bislang ausgeklammert wurden.



Das Rasterkraftmikroskop (AFM) misst Kräfte zwischen Atomen im Pikonewton-Bereich



Schematische Darstellung
der Proteinfaltung

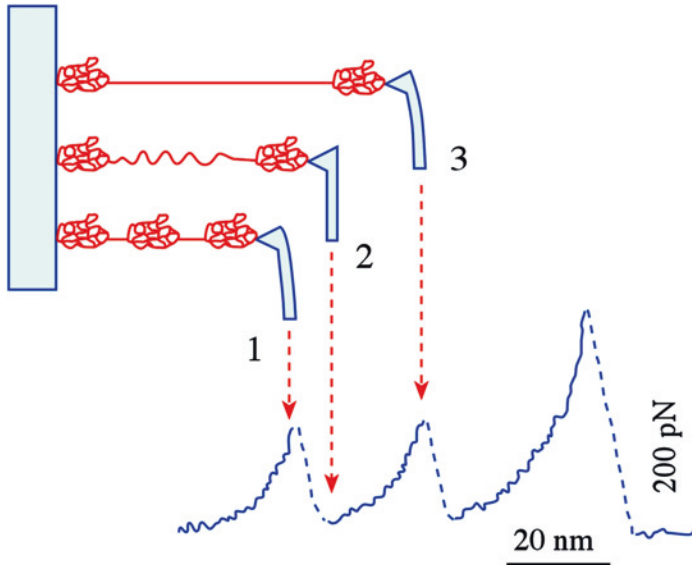
Proteine erfüllen lebenswichtige passive und aktive Funktionen. Als Nanomaschinen verarbeiten sie Materie, Energie und Information

11.5.2 Kraftspektroskopie an Proteinen: komplexe Verwandlungen begreifen

Proteine sind essenzielle Bestandteile aller lebenden Systeme. Diese Biopolymere bestehen aus einer Kette von mehreren hundert über Peptid-Bindungen verknüpften Aminosäure-Molekülen. Nach der Synthese faltet sich die Kette spontan zu einem dreidimensionalen Makromolekül. Der Faltungsprozess stellt ein kleines Wunder molekularer Selbstorganisation dar. Wenn die äußeren Randbedingungen (z. B. Temperatur, pH-Wert) stimmen, entfaltet sich ohne weiteres Zutun die dynamische räumliche Struktur der Makromoleküle. Sie bestimmt die Funktion im Organismus, z. B. als Strukturproteine, Enzyme, molekulare Schalter, Pumpen oder Motoren. Als „Nanomaschinen“ verarbeiten Proteine Materie, Energie und Information und dienen so der Aufrechterhaltung lebenswichtiger Prozesse im Organismus auf zellulärer und subzellulärer Ebene. Ihre Funktion ist an die Struktur gebunden, und diese ist bereits als molekularer Code in der Abfolge der Aminosäure-Bausteine der Kette angelegt. Es bedarf geeigneter Randbedingungen, um die jeweiligen Funktionen zu entfalten und aufrecht zu erhalten. Die Maschinenmetapher entstammt der klassischen Begriffswelt. Sie darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Arbeitsweise der Biomoleküle in einem Übergangsbereich nahe an der Quantenphysik anzusiedeln ist.

Das AFM im Kraftspektroskopie-Modus ermöglicht Kraft-Dehnungs-Messungen an Proteinen. Sie lassen Rückschlüsse auf die Faltungsprozesse und ihre Dynamik zu. Beispielhaft ist die Untersuchung von Titin-Molekülen im AFM (Rief et al. 1997). Titin ist ein hoch elastisches Riesenprotein, das für die Elastizität von Muskeln und ihre Zerreißfestigkeit bedeutsam ist. Es ist aus einer linearen Kette eines anderen globulären Proteins aufgebaut, dem Immunglobulin (Ig). Beim Ziehen des Moleküls ergibt sich ein nichtlinearer Kraftverlauf mit zahlreichen Kraftspitzen, die beim sukzessiven Entfalten von einzelnen Ig-Abschnitten auftreten. Trotz der Verlängerung des Moleküls sinkt die Kraft immer wieder ab. Das Protein wird abschnittsweise verlängert, ohne dass es zerreißt ■ Abb. 11.9.

Der Rückgang der Zugkraft ist verschieden von der monotonen Zunahme der Rückstellkraft beim Dehnen elastischer Federn. Die Elastizität von gewöhnlichen kristallinen Festkörpern wie Stahl beruht darauf, dass die atomaren Bausteine periodisch angeordnet sind. Bei Vergrößerung der Teilchenabstände muss Arbeit geleistet werden, welche die innere Energie erhöht. Diese Materialien kann man daher als „Energiefedern“ charakterisieren. Die Elastizität weicher kondensierter Materie wie Gummi, mancher Kunststoffe (Elastomere) sowie von biologischem Gewebe hängt dagegen nicht primär von der



■ **Abb. 11.9** Kraftspektroskopie mit dem AFM an einem Titin-Molekül (Bao und Suresh 2003)

Energie ab, sondern wird von der Entropie dominiert. Diese Stoffe enthalten langkettige ineinander verschlungene Moleküle, die man als „Entropiefedern“ auffassen kann.

So wirkt die zum Strecken der Ig-Abschnitte benötigte Kraft temperaturabhängigen entropischen Prozessen entgegen, die das Kettenmolekül dynamisch in einem verknäulten Zustand möglichst hoher Entropie halten. Ähnlich den Gliedern einer geschüttelten Kette rotieren oder oszillieren kleinere Abschnitte des Moleküls, ohne dass in größerem Umfang Bindungskräfte betätigt werden. So steigt die entropische Kraft beim Entwirren des Knäuels aus dem Zustand hoher Entropie zunächst an und fällt dann nahezu auf null, obwohl eine weitere Dehnung erfolgt. Titin funktioniert wie eine seltsame, nichtlineare Entropiefeder, die bei Anspannung wiederholt weich wird. Sie wirkt wie ein molekularer Stoßdämpfer, der die bei der Dehnung zugeführte Energie stufenweise dissipiert. Auf diese Weise verhindern bei einem einzelnen Titin-Kettenmolekül viele Entropiefedern in Serie das Zerreißen der Energiefedern, der chemischen Bindungen des Kettengerüsts. Im Muskel erhöht das Zusammenwirken einer Vielzahl von Titin-Strukturproteinen dessen mechanische Belastbarkeit.

Das überraschende superelastische Verhalten langkettiger Biomoleküle regt zu kreativen Ideen beim Design neuer biologisch inspirierter Materialien an. Spinnenseide zeigt beispielsweise ein ähnliches Verhalten (Porter und Vollrath 2007). Ihre Zerreißfestigkeit ist mit Stahl vergleichbar, doch sie lässt sich



Das Muskel-Protein Titin verhält sich unter Zug wie eine seltsame nichtlineare Feder

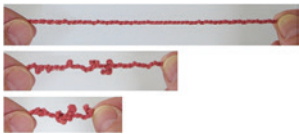
erheblich weiter dehnen, bevor sie zerreißt. Ihr elastisches Verhalten lässt sich mit dem im Anschluss vorgestellten, einfach nachzubauenden Extensometer im Projektunterricht untersuchen (Euler 2008a). Erkenntnisse aus der Nanowissenschaft finden Eingang in materialwissenschaftliche Innovationen.

11.5.3 Strukturbildung bei Gummibändern: Kraftspektroskopie in Aktion

Auf der Basis obiger theoretischer Vorüberlegungen lassen sich Prinzipien der Kraftspektroskopie an Proteinen im Modellexperiment erfahrbar machen. Das in **Abb. 11.10** gezeigte AFM-Modell im Kraftspektroskopie-Modus besteht aus einem dünnen elastischen Balken als Kraftsensor. Die Probe ist an dem Balken und dem Stift eines Grafiktablets befestigt und wird manuell gedehnt. Die kraftabhängige Verbiegung des Balkens bei Dehnung der Probe wird durch einen aufgeklebten Dehnungsmessstreifen elektrisch erfasst und zusammen mit der Position des Stiftes im Computer weiterverarbeitet. Der Low-Cost-Aufbau entspricht dem eines Extensometers, wie es in der Materialwissenschaft zur Messung von Elastizitätsmodul und Zerreißfestigkeit eingesetzt wird.

Als makroskopisches Modell des Titin-Moleküls dient ein gewöhnlicher Gummiring. Jeder kennt aus spielerischer Erfahrung die vielfältigen Formen, die dieser annimmt, wenn man ihn verdrillt. Bei genauerer Beobachtung lassen sich Regelmäßigkeiten erkennen. Man beginnt mit einem angespannten Gummiring, den man mehrfach verdrillt. Verkürzt man dieses helixartig gewundene Band, dann entstehen bei einer gewissen Länge schleifenartige Objekte. Bei kompletter Entspannung faltet

11



Strukturbildung an einem verdrillten Gummiring beim Vermindern der Zugkraft

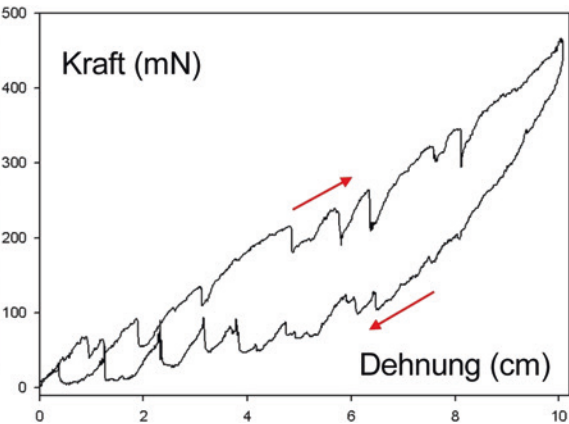
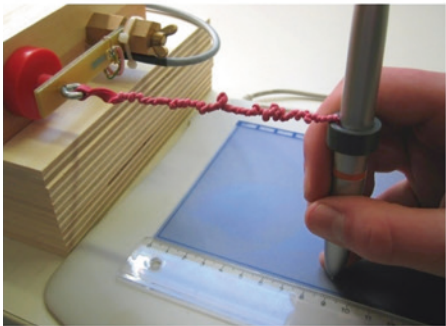


Abb. 11.10 Kraftspektroskopie an einem verdrillten Gummiband

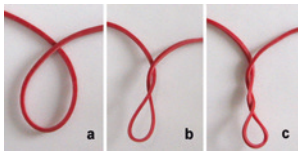
sich das Gummiband zu einem knäuelartigen dreidimensionalen Gebilde. Spannt man das Band wieder an, dann verschwinden die Strukturen sukzessive. Bei langsamem Entspannen bilden sie sich erneut aus, und zwar auf reproduzierbare Weise. Man spürt bereits mit den Fingern, dass sich dabei die Kraft ruckartig ändert.

Diese qualitative Erfahrung lässt sich mittels Kraftspektroskopie am Grafiktablett-Extensometer quantitativ untersuchen (Euler 2008b). Die Zugkraft in Abhängigkeit von der Dehnung zeigt eine irreguläre sägezahnartige Abfolge von Kraftsprüngen sowohl bei Verlängerung als auch bei Verkürzung des verdrehten Bandes, die mit dem Entstehen oder Verschwinden der verknäulten dreidimensionalen Strukturen gekoppelt sind. Die Kraft hängt nicht nur von der Dehnung, sondern auch von der Geschichte des Prozesses ab. Der Verlauf der Kraftfunktion zeigt dementsprechend Hystereseverhalten, angedeutet durch Pfeile (■ Abb. 11.10).

Der Kraftverlauf beim Anspannen ähnelt dem beim Auseinanderziehen der einzelnen Ig-Abschnitte des Titin-Moleküls. Die Verwandlungen des verdrehten Gummibands vermitteln eine anschauliche Vorstellung von den Faltungsprozessen, die bei den passenden Randbedingungen reproduzierbar verlaufen. Die Gummiband-Kraftspektroskopie macht Grundprinzipien molekularer Selbstorganisation buchstäblich greifbar. Sie bedürfen allerdings der konzeptuellen Einbettung, um deren umfassende Bedeutung zu begreifen. Die Experimente vermitteln grundlegende Einsichten in die Nanomechanik des Lebens, die auf der Gestalt von Biomolekülen und deren Verwandlungsprozessen gründet. Einschränkend ist anzumerken, dass das verdrehte Gummiband insofern ein unvollkommenes Modell der entropischen Elastizität darstellt, als es nur den statischen Aspekt der Entropie von Strukturen und nicht deren Dynamik simuliert.

11.5.4 Nanomechanik in Genetik und Epigenetik: Die Entfaltung von Komplexität und ihre Steuerung

In der Genetik spielt die Nanomechanik elastischer Fadenmoleküle ebenfalls eine zentrale Rolle (Schiessel 2003). Träger der genetischen Information ist die DNA-Doppelhelix. Das DNA-Molekül besteht aus zwei Strängen eines Zucker-Phosphat-Gerüsts, das strickleiterartig durch komplementäre Basenpaare verbunden ist. Die Abfolge der Basen, gruppiert in Basentriplets, stellt den genetischen Code dar. Er steuert die Proteinsynthese und damit auch die Entwicklung des gesamten Organismus. Allerdings ist diese Steuerung keine kausale Einbahnstraße,



Schleifenbildung eines verdrehten Gummifades beim Verringern der Fadenspannung. Die Zahl der anfänglichen Drehungen entspricht der Zahl der Kontaktstellen

sondern in Rückkopplungsbeziehungen eingebunden. Prozesse im Organismus, seine Entwicklung, aber auch Umwelteinflüsse wirken wiederum auf die Ebene der Genetik zurück. Da auch Informationen jenseits des genetischen Codes einfließen, spricht man allgemeiner von epigenetischer Regulation. Dabei spielt die Nanomechanik der DNA eine wesentliche Rolle. Im Gegensatz zu den hochflexiblen Proteinfäden ist die DNA-Helix wesentlich starrer. In einem Kontinuum-Modell, das alle molekularen Details ausklammert, gleicht die Nanomechanik der DNA dem Verhalten eines dünnen elastischen Stabs, der Zug und Torsionskräften ausgesetzt ist.

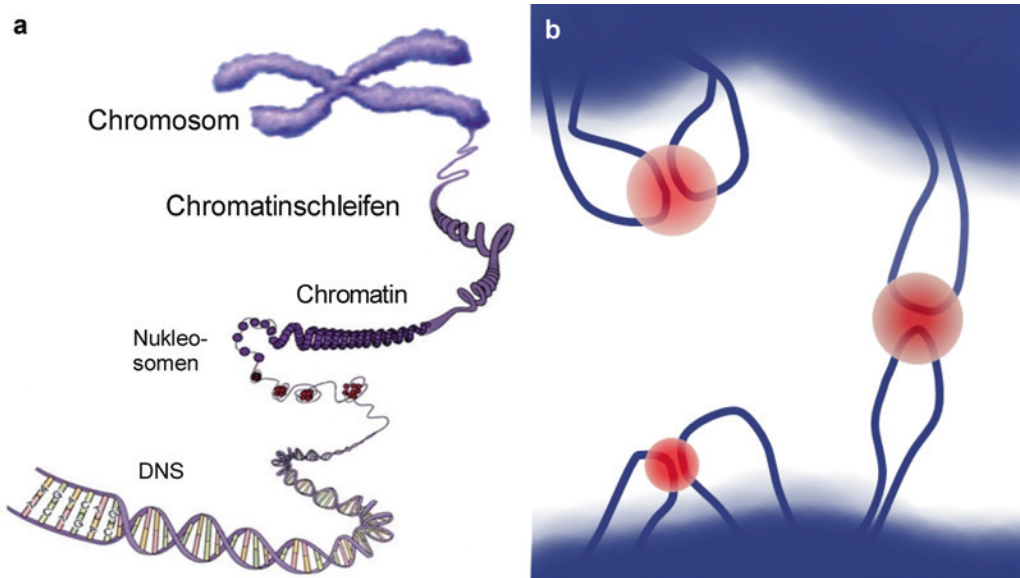
Wiederum liefert das Studium von Gummifäden Einsichten in die relevanten Basisprozesse (Euler 2010). Ein Gummifaden wird einmal vollständig um 360 Grad verdreht. Verringert man den Abstand der Fadenenden, krümmt sich der Faden spiralig ein, bis er eine komplette Schleife bildet. Dabei tritt der Faden mit sich selbst in Kontakt. Bei der Schleifenbildung wird die Verdrehung (Torsion) in eine Krümmung des Fadens umgewandelt. Seine Form stellt sich so ein, dass die Energie minimal wird. Bei einer Verdrehung um 720 Grad könnten sich theoretisch zwei Schleifen bilden. Es ist jedoch energetisch günstiger, wenn die Fäden sich an der Kontaktstelle ein weiteres Mal umeinander winden.

Diese mehrfach verschlungenen Strukturen werden bei der DNA als Supercoils bezeichnet. Es mag überraschen, dass die Modellierung molekularer Prozesse in der Genetik ein Verständnis der Mechanik elastischer Fäden erfordert. Tatsächlich nutzt die epigenetische Regulation mechanische Formänderungen von DNA-Molekülen und aggregierten Strukturen höherer Ordnung auf vielfältige Weisen auf verschiedenen Organisationsebenen.

Die DNA ist eines der längsten natürlich vorkommenden Moleküle. Das stellt die Natur vor ein Verpackungsproblem: Die DNA einer einzigen Zelle des Menschen hat bei einem Durchmesser von 2 nm eine Gesamtlänge von 2 m, der sie aufnehmende Zellkern ist aber nur einige Mikrometer klein. Die eigentliche Herausforderung ist nicht die Kleinheit des Kerns, sondern die sequenzielle Natur der gespeicherten Information. Die Verpackung muss eine adressierbare Entpackung zum Ablesen unterschiedlicher Abschnitte des genetischen Codes durch Transkriptionsprozesse ermöglichen, die zur Proteinsynthese führen. Die Schleifenbildung des Gummibands als ein mechanisches Basismodell für parameterabhängige Formänderungen veranschaulicht die Prinzipien des Verpackens und des Exponierens relevanter Abschnitte des genetischen Codes.

Bei Organismen, die über Zellkerne verfügen, erfolgt die Kompaktifizierung der DNA-Fäden durch Schleifenbildung mehrfach. Dies führt zu einer Folge von Hierarchieebenen in der Verdichtung des genetischen Substrats (■ Abb. 11.11).

Ein Nano-
Verpackungsproblem der
DNA im Zellkern



■ **Abb. 11.11** Hierarchische Verpackung der genetischen Information in Chromatin-Schleifen (a). Die Transkriptionsprozesse lesen die genetische Information einzelner Chromatinabschnitte (b)

- Die DNA-Doppelhelix ist bereits inhärent gewunden und stellt die erste Organisationsebene dar.
- Auf der nächsten Ebene bildet die DNA Schleifen, die sich um kleine Proteinmoleküle (Histone) winden und eine perlschnurartige Struktur bilden, bestehend aus den Nukleosomen.
- Die Nukleosompakete kondensieren spiralförmig zu einem größeren Strang mit einem Durchmesser von etwa 30 nm.
- Der Strang bildet größere Chromatinschleifen und weitere Strukturen im 300-nm-Bereich.
- Diese falten sich schließlich zu den Chromosomen, die bei geeigneter Präparation und Färbung unter dem Mikroskop bei der Zellteilung sichtbar sind.

Für die Ablesung des genetischen Codes müssen Chromatinabschnitte im Zellkern so exponiert werden, dass sie für Transkriptionsprozesse zugänglich sind. Die Schleifenbildung des verdrehten Gummibands vermittelt eine mechanische Intuition davon, wie bestimmte Abschnitte des sequenziellen genetischen Codes sich für die Weiterverarbeitung präsentieren. Die exponierten Schleifen ragen in die Zwischenräume der kondensierten Chromatinbereiche. Die Information im Bereich maximaler Krümmung an der Spitze wird von der Transkriptionsmaschinerie im Interchromatinbereich abgelesen. Auf diese Weise ist es möglich, Information zu kombinieren, die

Intuitives Verstehen und epistemische Zugänglichkeit fördern: die produktive Rolle von Spielzeugmodellen und experimentellen Erfahrungen

11

Prinzipien der Nanostrukturierung: Bottom-up- und Top-down-Prozesse

auf entfernten DNA-Abschnitten oder auch auf verschiedenen Chromosomen vorliegt. Damit eröffnen sich nahezu unerschöpfliche Möglichkeiten für genetische Kombination, Regulation und Anpassung.

Das Gummibandexperiment stellt eine Art Intuitionsmaschine dar. Es unterstützt bei der mentalen Erschließung basaler Prinzipien, die hinter einer Unmenge biochemische Details verborgen sind. Als Spielzeugmodell regt es die Vorstellungskraft an, stimuliert Modellbildungsprozesse und erhöht die epistemische Zugänglichkeit komplexer Zusammenhänge und Abläufe. Im vorliegenden Kontext verbindet es Mechanik und Genetik, zwei weit auseinanderliegende Wissenschaftsfelder. Es veranschaulicht, wie mechanische Eigenschaften auf der Nanometerskala bei der Orchestrierung von Lebensprozessen auf verschiedenen hierarchisch organisierten Ebenen mit biochemischen Vorgängen zusammenwirken.

Als Basismodell der Strukturbildungsprozesse, die sich selbst organisieren und unterhalten, kann man idealtypisch einen Rückkopplungskreis identifizieren. Er verbindet zwei Hierarchieebenen der Organisation: die Ebene der Biochemie und die Ebene der Mechanik. Mechanische Eigenschaften wie die Elastizität existieren nicht auf der Ebene von Atomen und kleinen Molekülen. Die elastischen Eigenschaften der DNA entstehen im Zusammenwirken ihrer molekularen Bausteine. Sie werden außerdem von der Umgebung beeinflusst. Biochemische Prozesse im Umfeld wirken auf die mechanischen Eigenschaften der DNA/Chromatin-Stränge zurück und verändern deren mechanische Struktur. Der Kreis schließt sich, indem die durch die mechanische Formänderung ermöglichten Transkriptionsprozesse neue biochemische Prozesse anstoßen.

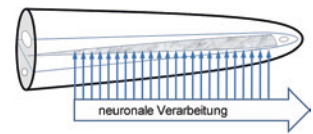
Das Rückkopplungsprinzip ist universell und unterliegt Strukturbildungsprozessen auf ganz unterschiedlichen Substraten. Lebende Systeme strukturieren sich so über viele Organisationsebenen hinweg. Ausgehend vom Zusammenwirken von Strukturen auf der Nanoskala entwickeln sie makroskopische Eigenschaften (Bottom-up-Strukturbildung). In technischen Mikro- und Nano-Systemen ist die Nutzung derartiger Strukturierungsprinzipien bislang nur in ersten Ansätzen gelungen. Hier ist man auf Methoden der Top-down-Strukturierung angewiesen. Für die Informationstechnologie kann man mittlerweile Strukturen auf Halbleiteroberflächen im Bereich weniger Nanometer herstellen (vgl. Produktion von Computerelementen).

11.5.5 Nano-Prozesse hören: Das Ohr als natürliches Nanosensorsystem

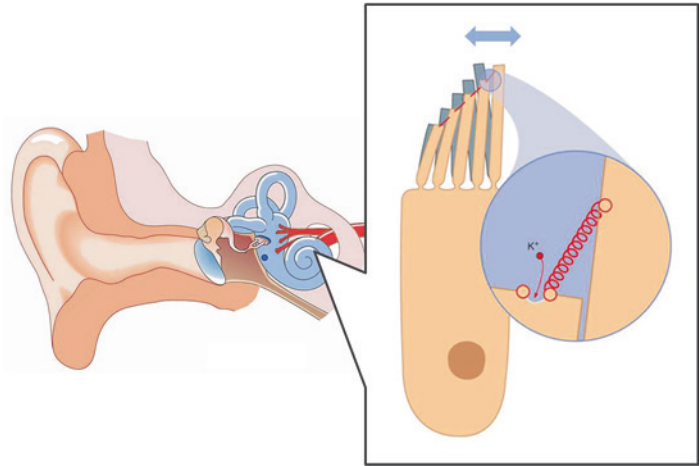
Entgegen der Erwartung sind dynamische Prozesse auf der Nanometerskala durchaus wahrnehmbar. Unser Gehör ist so empfindlich, dass wir fast das Auftreffen von Atomen auf das Trommelfell als thermisches Rauschen wahrnehmen könnten. Seine enorme Leistungsfähigkeit als Schallempfänger beruht auf dem orchestrierten Zusammenwirken natürlicher Nanosensorsysteme. Ähnlich einer seriellen Anordnung von Rasterkraftmikroskopen tasten die Spitzen mechanischer Sinneszellen Schwingungsmuster ab, die sich entlang einer Membran im Innenohr ausbreiten.

Am Anfang der Wandlungskette stehen mechanische Schwingungen. Schallsignale der Luft werden über Außen- und Mittelohr in das mit Flüssigkeit gefüllte Innenohr übertragen, wo sie Schwingungen an der Grenzfläche zwischen zwei Kanälen auslösen. Diese breiten sich als Wanderwellen entlang einer elastischen Trennwand aus, der Basilarmembran. Die Dispersion der Wanderwellen trennt die einzelnen Frequenzanteile. An der Hörschwelle sind wir in der Lage, Schwingungsamplituden der Basilarmembran im Sub-Nanometer-Bereich wahrzunehmen. Wir fokussieren nur auf die Wandlungs- und Funktionsprinzipien ohne auf die komplexen biophysikalischen Details einzugehen (vgl. dazu Euler 1996).

Die Wandlung von Schallsignalen erfolgt in mechanischen Sinneszellen, den Haarzellen (■ Abb. 11.12). Ihre härchenartigen Fortsätze (Cilien) arbeiten ähnlich einem System von Kraftmikroskopen. Wie der winzige Balken eines Kraftmikroskops wird das Cilienbündel von den schallinduzierten Schwingungen der Basilarmembran verbogen. Die Verbiegung setzt weitere mechanische und elektrochemische Prozesse in Gang. Die einzelnen Cilien verhalten sich wie starre, am Fuß biegsam verankerte Stäbchen. Die Verbiegung des Cilienbündels als Ganzes bewirkt eine Scherbewegung zwischen den einzelnen Härchen (Karavitaki und Corey 2010). An deren Spitzen befinden sich fadenförmige Proteinmoleküle, die mit den benachbarten längeren Härchen verbunden sind und bei der Scherbewegung des Bündels in Richtung auf die Spitze angespannt werden. Dabei betätigen sie molekulare Schalter in den Spitzen, die sich wie eine mechanisch betätigte Schnapptür öffnen. Das führt zum Einströmen von K^+ -Ionen in das Zellinnere, was eine elektrochemische Signalwandlungskette in Gang setzt. Es kommt zu einer Depolarisation des Membranpotenzials. Dadurch werden chemische Transmitterstoffe an den Synapsen freigesetzt, die Nervenimpulse auslösen. Diese werden von den einzelnen



Mechanische Sensorzellen im Innenohr tasten ähnlich einer Reihe von Kraftmikroskopen Schwingungsmuster auf der Basilarmembran des Innenohrs ab



■ **Abb. 11.12** Haarzellen als mechanische Sensorzellen. Die Verbiegung eines Bündels von Sinneshärchen wird erfasst und elektrochemisch weiterverarbeitet

Fasern des Hörnervs orts aufgelöst zur zentralen Verarbeitung weitergeleitet.

Auch Haarzellen können, wie das AFM, passiv und aktiv arbeiten. Neben ihrer passiven, sensorischen Funktion sind sie in der Lage, aktiv Kräfte zu generieren. Dies geschieht in zwei verschiedenen Typen von Haarzellen. Die inneren Haarzellen arbeiten sensorisch und wandeln Schwingungen in neuronale Impulse; die äußeren erfassen sensorisch die Schwingungsphase und pumpen phasengekoppelt Energie zyklisch in das System. Ihre mechanische Aktivität verstärkt so schwache akustische Signale und erhöht die Empfindlichkeit sowie die Trennschärfe des Ohrs. Im empfindlichsten Hörbereich bei ca. 3 kHz ist eine Schallintensität von $0,5 \cdot 10^{-16} \text{ W/cm}^2$ gerade wahrnehmbar. Bei einer Fläche des Gehörgangs von 1 cm^2 entspricht die Hörschwelle dem Empfang einer Signalquelle mit einer Sendeleistung von 10 W in 1000 km Entfernung. An der Hörschwelle horchen wir in dynamische Prozesse der Nanowelt hinein: Schwingungsamplituden im Innenohr im Bereich von 10^{-10} m reichen bereits für eine Hörwahrnehmung aus.

Das Gehör offenbart in der parallelen Anordnung von Sensor- und Motorsystemen und der resultierenden aktiven Verstärkung ein weiteres wichtiges Prinzip, wie sich aus dem Zusammenspiel von vielen kleinen Systemen eine möglichst große Wirkung ergibt. Eine erste plausible Vermutung ist die Annahme, dass viele Nanosysteme, die parallel arbeiten, auch viel bewirken. Nach diesem Prinzip arbeiten beispielsweise die molekularen Motoren im Muskel, die weitgehend unabhängig voneinander über viele kleine ruckartige Bewegungsschritte schließlich eine kontinuierliche makroskopische

Muskelkontraktion bewirken. Dies klärt die Verstärkerwirkung beim Gehör aber nur unvollständig. Die aktiv erzeugten Schwingungen der motorischen Haarzellen erfolgen nicht unabhängig voneinander, sondern ein kleiner Abschnitt der Basilarmembran schwingt kohärent. Die Oszillationen erfolgen im gleichen Takt. Dadurch wächst das Nutzsignal proportional zur Zahl N der kohärent schwingenden Systeme an und das Rauschen wird besser unterdrückt, da dieses nur mit $N^{1/2}$ anwächst.

Ein ähnlicher Synchronisierungseffekt erfolgt auch in der neuronalen Verarbeitung. Im niederfrequenten Bereich (unter ca. 1 kHz) erfolgen die von einem periodischen mechanischen Reiz in der Sensorzelle ausgelösten Impulssalven weitgehend im Gleichtakt mit der Periodizität der Anregung (Euler 2006, 2012b). Die neuronalen Impulsmuster bilden so die periodische Struktur des akustischen Signals in Realzeit ab. In unserem Gehirn ist dieses sog. Periodizitätsprinzip zentral für die Verarbeitung von Sprache. Es versagt jenseits von 1 kHz, da die Güte der Synchronisierung mit zunehmender Frequenz nachlässt. Dies löst rückblickend die Frage, warum Gulliver die Sprache der Liliput-Menschen prinzipiell nicht erlernen kann. Seine neuronalen Prozesse sind zu langsam, um im Gleichschritt mit dem akustischen Reiz zu bleiben.

Verstärkung durch Kohärenz: Das orchestrierte Zusammenwirken vieler Nanosysteme und die Emergenz makroskopischer Systemeigenschaften

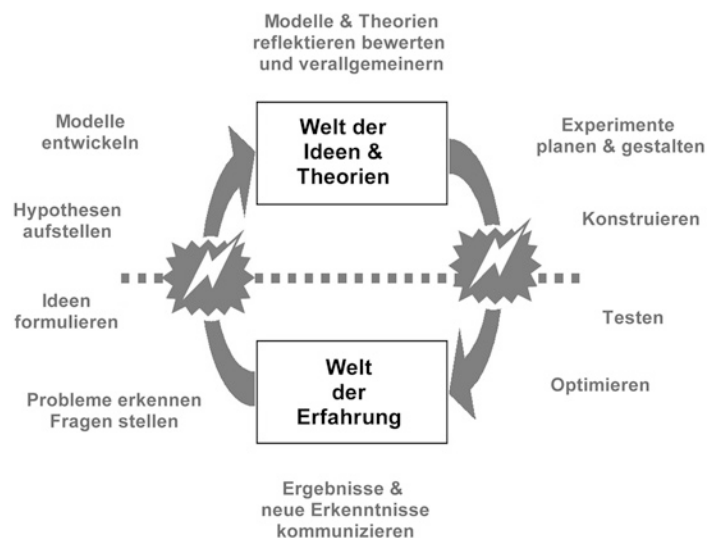
11.6 Nano im MINT-Unterricht: Experimentieren, Modellieren, kreative Prozesse anstoßen

Die griechischen Naturphilosophen waren die ersten, die auf spekulativem Wege zur Atomvorstellung gelangten. Für Demokrit sind Atome die primäre Realität. Alles andere entsteht aus ihrer Anordnung und Bewegung. Die Vision der frühen Atomisten bildet heute die Grundlage neuer Technologien. Die Entwicklung der Nanowissenschaft hat Werkzeuge geschaffen, um Systeme auf der Nanometerskala herzustellen, deren Eigenschaften zu untersuchen und gezielt zu beeinflussen. All das eröffnet neue Möglichkeiten sowohl in den klassischen Technologiefeldern als auch im Bereich der Biotechnologie und der Medizin. Die Nanotechnologie ist bei Schülerinnen und Schülern positiv besetzt und stößt auf breites Interesse, nicht zuletzt auch durch die Produkte, die sie hervorgebracht hat und die unsere Lebenswelt grundlegend verändern. Insofern sind die Voraussetzungen für eine Integration der Themen in den Unterricht günstig. Gleichzeitig ist es nötig, neben den Chancen auch die Risiken neuer Technologien adäquat zu thematisieren, um die Lernenden für einen reflektierten und verantwortungsvollen Umgang zu sensibilisieren.

Für den Unterricht in den MINT-Fächern ergeben sich vielfache Anknüpfungspunkte, aber auch Herausforderungen. Letztere sind bedingt vor allem durch die interdisziplinäre Verortung des Feldes sowie durch die Universalität der Struktur- und Funktionsprinzipien, die häufig den Rahmen der traditionellen Fachsystematik sprengen. In Bezug auf die Erfüllung von Bildungsstandards hat die Behandlung von Nanothemen im Unterricht das Potenzial, grundlegende und weitgehend authentische Einblicke in naturwissenschaftliche ebenso wie in technische Arbeitsweisen zu vermitteln, um die bestehenden Gemeinsamkeiten, aber auch die Unterschiede zu verdeutlichen (Euler 2018). Dies erscheint vor allem im Hinblick auf Entscheidungsprozesse zur beruflichen Orientierung der Jugendlichen wesentlich.

Primäres Ziel der Naturwissenschaften ist es, neues Wissen zu generieren. Technik ist fokussiert auf die Schaffung von Produkten und deren Anpassung und Optimierung in Hinblick auf gesellschaftliche Bedürfnisse. Beide Bereiche sind eng verzahnt (■ Abb. 11.13). Die Wissenschaft entwickelt und nutzt Instrumente und Methoden, die auf technischen Systemen basieren. Technik baut auf dem Wissen und den neuen Instrumenten auf, welche durch Entwicklungen der Wissenschaft ermöglicht werden.

Idealtypisch lassen sich die Arbeitsweisen im Zusammenspiel von Experimentieren und Modellieren in ein zyklisches Modell einbetten, das auch dem Konzept des forschend-entwickelnden



■ **Abb. 11.13** Naturwissenschaftliches und technisches Arbeiten. Das zyklische Modell von Forschen und Entwickeln liegt auch dem Design entsprechender Unterrichtsmodelle zugrunde

Unterrichts zugrunde liegt (Engeln et al. 2013; Minner et al. 2010). Es hat in vielfältigen Variationen in die didaktische Literatur zu „Inquiry Based Teaching/Learning“ Eingang gefunden (vgl. z. B. Eisenkraft 2003). Es verbindet die Welt der Erfahrung mit der Welt der Ideen. Beide gehören unterschiedlichen Ebenen der Wirklichkeit an, angedeutet durch die gepunktete Trennlinie. Zwischen beiden vermitteln kreative Prozesse sowohl in Auf- als auch in Abwärtsrichtung. Der Zyklus entspricht weitgehend auch dem Modell von Prozessen physikalischer Erkenntnisgewinnung, wie es bereits Einstein formuliert hat, und das insbesondere auf die wichtige Rolle der schwer fassbaren kreativen Prozesse verweist (Holton 1998).

Unter kognitionspsychologischer Perspektive spiegelt das generative Modell das Ineinandergreifen verschiedener Wissensformen, die sich (nicht nur mit Blick auf die Physik) folgendermaßen in komplementärer Weise beschreiben lassen (Sloman 1996):

- das logisch-analytische formale Wissen
- das modell- und erfahrungsbasierte prozedurale analogische Wissen

Der erste Bereich steht für die formale Strenge, die Abstraktheit und damit einhergehend für die besondere Schwierigkeit der Physik in den Augen vieler Schülerinnen und Schüler. Der zweite Bereich umfasst unser unmittelbares, intuitives Verstehen. Er steht für Direktheit und Einfachheit des Schließens, erlaubt schnelle Schlüsse und Verknüpfungen, ist aber extrem anfällig für Fehltritte und Fehlvorstellungen.

Experimente erfüllen vielfältige Funktionen. Das gilt sowohl für die Forschung als auch für den Unterricht. Während in der traditionellen Sichtweise von Wissenschaft Experimente als bloße Testinstanzen für Modelle und Theorien angesehen werden, können sie ein produktives Eigenleben entwickeln und Erkenntnisprozesse in eine erfolgversprechende Richtung lenken (vgl. Euler 2004). Der Beitrag baut auf dieser generativen Funktion des im Kontext experimenteller Handlungen erworbenen prozeduralen Wissens auf. Experimente, Modelle und Analogien spielen eine zentrale Rolle, um relevante Strukturprinzipien der Nanowelt zu erschließen. Die Experimente machen das Unanschauliche anschaulich und das Abstrakte konkret. Das in den experimentellen Verfahren repräsentierte prozedurale Wissen hilft dabei, unterschiedliche Erfahrungsbereiche zu verknüpfen. Es unterstützt so den Wissenstransfer. Die Reflexion der Modelle und der Analogien hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und ihrer Grenzen darf allerdings bei der Umsetzung nicht fehlen. Um Reflexions-, Bewertungs- und Transferprozesse anzuregen ist die theoretische Einbettung der Experimente zentral. Das erfordert eine geeignete instruktionale Unterstützung

durch die Lehrkraft. Der Beitrag kann diesbezüglich nur kurso-rische Hinweise zum konzeptuellen Hintergrund liefern. Der Unterricht muss ein adäquates Umfeld schaffen, das einerseits am Vorwissen anknüpft und andererseits die Lernenden zur konzeptuellen Reflexion und Reorganisation anregt und sie auf dem Weg der Abstraktion unterstützt.

Mögen die Experimente und ihre Adaption im Unterricht möglichst viele Schülerinnen und Schüler dazu anregen, sich mit Prinzipien der Nanowelt und Entwicklung der Nanotechnologien kreativ und reflektiert auseinanderzusetzen, um an einer humanen und nachhaltigen Gestaltung unserer Zukunft teilzuhaben.

Literatur

- Bao, G., Suresh, S. (2003). Cell and molecular mechanics of biological materials. *Nature Materials* 2, 715–725
- Barr, M., Zalatel, M., Heller, E. (2010). Quantum Corral Resonance Widths: Lossy Scattering as Acoustics. *Nano Lett.* 10, 3253–3260
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., Weibel, E. (1982). Tunneling through a controllable vacuum gap. *Appl. Phys. Lett.* 40, 178–180
- Binnig, G., Quate, C., Gerber, C. (1986). Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.* 56, 930–933
- Crommie, M.F., Lutz, C.P., Eigler, D.M. (1993). Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. *Science* 262, 218–220
- Dragoman, D., Dragoman, M. (2004). *Quantum-Classical Analogies*. Berlin: Springer
- Eigler, D., Schweizer, E. (1990). Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature* 344, 524–526
- Eisenkraft, A. (2003). Expanding the 5E model. *The Science Teacher* 70(6), 56–59
- Engeln, K., Euler, M., Maaß, K. (2013). Inquiry-based learning in mathematics and science: a comparative baseline study of teachers' beliefs and practices across 12 European countries. *ZDM – The International Journal on Mathematics Education* 45(6), 823–836
- Euler, M. (1996). Biophysik des Gehörs. Teil I: Von der passiven zur aktiven Wahrnehmung. *Biologie in unserer Zeit* 26, 163–172
- Euler, M. (2001). *Mikrowelten: Eine Reise in die Mikrosystemtechnik*. Teltow: VDI/VDE-Technologiezentrum
- Euler, M. (2004). The role of experiments in the teaching and learning of physics. *Research on Physics Education, Varenna Course CLVI*, Amsterdam, IOS Press, 175–221
- Euler, M. (2006). Hands-on Synchronization: An Adaptive Clockwork Universe. *The Physics Teacher* 44, 28–33
- Euler, M. (2008a). Hooke's law and material science projects: exploring energy and entropy springs. *Physics Education* 43, 57–61
- Euler, M. (2008b). Hands-on force spectroscopy: weird springs and protein folding. *Physics Education*. 43, 305–308
- Euler, M. (2010). Nanomechanik des Lebens zum Anfassen. Spiele mit Gummibändern. *Physik in unserer Zeit*, 41, 300–304
- Euler, M. (2012a). Near-Field Imaging with Sound: An Acoustic STM Model. *The Physics Teacher* 50, 349–351
- Euler, M. (2012b). Gekoppelte Uhren, Geistertöne und Gedankenblitze. *Physik in unserer Zeit* 43, 40–44

- Euler, M. (2013). The sounds of nanoscience: acoustic STM analogues. *Physics Education* 48, 563–569
- Euler, M. (2018). Empowering the Engines of Knowing and Creativity: Learning From Experiments. In: Sokołowska D., Michelini M. (eds) *The Role of Laboratory Work in Improving Physics Teaching and Learning*. Springer, Cham, 3–14
- Fiete, G., Heller, E. (2003). Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. *Rev. mod. phys.* 75, 933–948
- Gerber, C., Lang, H.P. (2006). How the doors to the nanoworld were opened. *Nature Nanotechnology* 1, 3–5
- Holton, G. (1998). *The Advancement of Science and Its Burdens*. Cambridge: Harvard UP
- Karavita, K., Corey, D. (2010). Sliding Adhesion Confers Coherent Motion to Hair Cell Stereocilia and Parallel Gating to Transduction Channels. *The Journal of Neuroscience* 30, 9051–9063
- Klein, O. (1963). Glimpses of Niels Bohr as Scientist and Thinker. In: Rozen-daal S, ed. *Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues*. Amsterdam: North-Holland, 74–93
- Minner, D.D., Levy, A.J., Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction—what is it and does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *J. Res. Sci. Teach.* 47, 474–496
- Novotny, L. (2007). The History of Near-field Optics. *Progress in Optics* 50, 137–184
- Porter, D., Vollrath, F. (2007). Nanoscale Toughness of Spider Silk. *Nanotoday* 2(3), 6
- Planinsic, G., Kovac, J. (2008). Nano goes to school: a teaching model of the atomic force microscope. *Physics Education* 43, 37–45
- Rief, M., Gautel, M., Oesterhelt, F., Fernandez, J.M., Gaub, H.E. (1997). Reversible unfolding of individual titin immunoglobulin domains by AFM. *Science*, 276, 1109–12
- Schiessel, H. (2003). The Physics of Chromatin. *J. Phys.: Condens. Matter* 15, R699–R774
- Sloman, S. (1996). The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological Bulletin* 119, 3–22
- Thees, M., Hochberg, K., Kuhn, J., Aeschlimann, M. (2017). Adaptation of acoustic model experiments of STM via smartphones and tablets. *The Physics Teacher* 55, 436–437
- Tumey, C. (2009). Truth and Beauty at the Nanoscale. *Leonardo* 42(2), 151–155