

Der menschliche Lebensraum zwischen Atom und Kosmos:

eine Reise durch Dimensionen und Disziplinen

Teil II

Alfred Pflug

5. Von Seidentüchern und Seifenblasen: Lichtwellenlängen und atomare Größenerstreckung im Spiegel der Alltagserfahrung

5.1 Eine physikalische Gardinenpredigt erhellt die Struktur des dauergewellten Lichtes

Der große österreichische Physiker Ludwig Boltzmann, genialer und prophetischer Wegbereiter der modernen Atomvorstellung, wurde von seinem Kollegen und Widersacher Ernst Mach, ebenfalls Physiker von Format, aber noch tief dem Gedankengut des 19. Jahrhunderts verpflichtet, in welchem jegliches Konzept der Materie von den an das elektromagnetische Feld gekoppelten, kontinuierlichen Ladungs- und Stromdichtenbildern geprägt war, oftmals wegen seiner querdenkerischen Überzeugung mit den Worten gehänselt: "Haben Sie schon je ein Atom gesehen?" Versteht man den Begriff des Sehens ganz wörtlich und meint damit eine direkte optische Abbildung eines einzelnen Atoms auf der menschlichen Netzhaut mit Hilfe von sichtbarem Licht, so ist ein solcher Prozeß in der Tat unmöglich, weil die Wellenlänge dieser Strahlung zu groß ist, um die Kleinheit atomarer Dimensionen aufzulösen.

Dennoch läßt sich durch systematisches, zweidimensionales Abtasten einer (leitenden) Oberfläche mit einer feinen (Blitzableiter)-Spitze im Rastertunnelmikroskop unter elektrischer Strom- und damit Abstandskontrolle ein plastisches Bild der atomaren Landschaft auf den Computerschirm zeichnen: wegen der Möglichkeit, Atome im elektrischen Feld durch den piezoelektrischen Effekt *kollektiv* zu bewegen, können die unvermeidbaren Schwankungen auf Grund der thermischen Bewegung die Position des Mittel- oder Schwerpunktes einer ganzen Atomgruppe (Ebene oder räumlicher Block) aus N Elementen gegenüber dem einzelnen Atom nur um den Faktor $1/\sqrt{N}$ unterdrückt verschieben; für $N \approx 1000$ beträgt dieser Fluktuationseffekt tatsächlich nicht mehr als 3% der atomaren thermischen Zitterbewegung und spielt für die Auflösungsbegrenzung keine wesentliche Rolle mehr.

Obwohl es heute auf dem Lehrmittelmarkt schon Rastertunnelmikroskope zum Preis eines gehobenen Mittelklasse-Gebrauchtwagens gibt, wollen wir wirkliche Low-Cost Experimente in der Kostenkategorie eines Hamburgers zur Bestimmung von Lichtwellenlänge und Atomgröße schildern. Die Materialien hierfür sind vermutlich in jedem Haushalt vorhanden oder können zumindest einfach und billig in jedem größeren Ort besorgt werden. Dabei besteht die nicht ganz unberechtigte Hoffnung, daß die Initiative zu solchen Freihandversuchen auch von Schülern und vor allem Schülerinnen in selbständiger Weise wahrgenommen werden kann, weil es hier

kein Imageproblem zu überwinden gilt: nichts erinnert bei der Durchführung an Schule, geschweige denn an den Physikunterricht.

Für die größenordnungsmäßige Bestimmung der Lichtwellenlänge brauchen wir eine möglichst helle Lichtquelle, die nicht flächenhaft ausgedehnt sein soll, sowie ein möglichst feinmaschiges Gewebe mit aufeinander senkrecht stehenden Fäden von Kette und Schuß. Der Glühfaden einer *klaren* Glühbirne von 40-60 W elektrischer Leistung bei 220 V Versorgungsspannung ist dafür recht gut geeignet, wenn er einigermäßen geradlinig verläuft und keine Knicke aufweist. Glühbirnen höherer Leistung sowie NiederVoltlampen aus dem Autobereich (12 V, mehr als 5 W) haben im allgemeinen zu dicke Wendel, was das Auflösungsvermögen des Experiments verringert.

Noch besser als normale Glühlampen des Haushaltsbereichs haben sich kleine Halogenlämpchen mit Steckfassung und beinahe punktförmiger Glühwendel, wie sie etwa in Taschenlampen Verwendung finden, bewährt. Ihre zylindrische Außenkontakthülse wird mittels eines 1/2 oder 3/8 zölligen Schlauchbinders an der kurzen Kontaktlatzschleife einer 4,5 V Flachbatterie elektrisch leitend befestigt. Die lange, federnde Zunge des Minuspols dient als Schalter, der den isolierten Mittelkontakt der Halogenlampe von hinten berühren kann und der sich in dieser Stellung mittels eines Klebebands leicht fixieren läßt. Da das Lämpchen auch bei abgesunkener Batteriespannung noch genügend hell leuchten soll, wählt man den Nennwert der Versorgungsspannung ein wenig unter dem Wert 4,5 V, also etwa 3,8 V bei einer typischen Stromstärke von 0,5 bis 0,8 A.

Blickt man nun aus der Entfernung von etlichen Metern durch ein enggewebtes, dünnes Stofftuch, das sich möglichst weit weg von der Lichtquelle und damit nahe vor dem Auge befinden soll - am besten einen feinen Schal aus heller Naturseide - auf die gerade Glühwendel der Haushaltsbirne oder den fast punktförmigen Faden der kleinen Halogenlampe, so sieht man neben dem hellen Zentralbild des glühenden Objekts auch noch mindestens acht deutlich lichtschwächere, dafür aber *farbig-verbreiterte* Beugungsbilder, deren Position gegenüber dem Zentrum in einem regelmäßigen Rechteckgitter verschoben erscheint. Dabei weisen die Eckpunkte des Beugungsrechtecks eine höhere Beugungsordnung als die Seitenmittelpunkte, nämlich 2 statt 1 auf und sind daher am dunkelsten. (Nimmt man statt des Gewebes aus Kette und Schuß etwa einen Nylonstrumpf mit komplizierterer Schlingenknüpfung, so wird, wie bei der Röntgenstrukturanalyse von organischen Molekülkristallen, auch das Beugungsbild merklich komplexer.) Verdreht man nun das beugende Stofftuch, so dreht sich das Gitter der Verschiebung gemäß der augenblicklichen Orientierung des Tuches synchron zu letzterem mit, während die Ausrichtung der einzelnen Beugungsobjekte mit derjenigen der Lichtquelle übereinstimmt und daher bei der Verdrehung des Tuches unverändert bleibt.

Univ. Prof. Dr. Alfred Pflug, Lehrstuhl für Physikdidaktik, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Otto-Hahnstr. 4, D-44227 Dortmund.
Nachdruck aus *Physik und Didaktik* 2/94 mit freundlicher Genehmigung.

Kippt man das Tuch bei festgehaltenem Mittelpunkt um eine Achse, die senkrecht auf die Verbindungslinie zwischen Auge und Lampe steht, so daß wie beim schrägen Durchblick durch eine Allee der Abstand der Fäden, die parallel zur Richtung der Drehachse verlaufen, *verkürzt* erscheint, so *vergrößert* sich dazu senkrecht, also in Richtung des verringerten Fadenabstands, die "Gitterkonstante" des beobachteten Beugungsrechtecks.

Aus diesem zunächst paradoxen Verhalten, das dem physikalischen Grundprinzip des sogenannten Rowlandgitters für den Ultraviolettbereich entspricht, können wir sofort schließen, daß unser *gitterartiges Beugungsbild* zu dem *realen beugenden Rechteckgitter* der Stofffäden gerade *komplementär* ist: *verkleinert* man die (effektive) Gitterkonstante der beugenden Struktur in einer bestimmten Richtung, so *vergrößert* sich die entsprechende Längendimension des gitterartigen Beugungsobjektes in der gleichen Richtung und umgekehrt: wird das Beugungsgitter weiter, so wird das im Beugungsbild sichtbare Gitter seinerseits enger. Die beobachtete Anordnung der Beugungsbilder der Lichtquelle stellt damit, in der Terminologie der Festkörperphysik, gerade das zum beugenden Muster der Stofffäden *reziproke* Gitter dar.

Entfernt man sich nun weiter von der Lampe, während man das Tuch in unverändert geringen Abstand vor Augen hält, so nimmt die Zellengröße des Verschiebungsgitters in jeder der beiden orthogonalen Richtungen proportional zur Entfernung von der Lampe zu, während das Einzelbild der Lichtquelle dabei laufend kleinere Ausmaße annimmt. Aus dieser Tatsache läßt sich zweifelsfrei schließen, daß das Beugungsrechteck dem Beobachter unter konstantem *Winkel* erscheint.

Befestigt oder hält man knapp unterhalb des Glühfadens der Lampe ein kleines, durchsichtiges Kunststofflineal und betrachtet das Beugungsmuster aus einer Entfernung von etwa 10 m - am besten unter Verwendung eines Fernglases mit acht- bis zehnfacher Vergrößerung, über dessen Objektiv man das Stofftuch einfach hinunterhängen läßt - so läßt sich, sogar für jede Spektralfarbe *frb* einzeln, der Beugungswinkel erster Ordnung $\alpha_{1,frb}$ auf höchst einfache Weise mit einer Genauigkeit von besser als 30% bestimmen: er ergibt sich unmittelbar im Bogenmaß aus dem Verhältnis des Abstandes, unter dem die erste (farbige) Beugungsordnung (an den Seitenmittelpunkten des Beugungsrechtecks) - relativ zum Zentralbild - oberhalb des Lineals (welches zugleich mit dem Beugungsobjekt scharf erscheint, da es in der Ebene des Glühfadens liegt) gesehen wird, zur Entfernung des Tuches und damit praktisch auch des Beobachters von der Lichtquelle. Man überzeugt sich unschwer von der Tatsache, daß für jede Farbe *frb* der Beugungswinkel $\alpha_{n,frb}$ genau so wie bei Schrägstellung des Tuches, zunimmt, wenn sich der Fadenabstand *d* in der entsprechenden Richtung - etwa durch Austausch des Tuches verkleinert. Typischerweise beträgt bei einem feinen Seidentuch die aus einer Entfernung von rund 10 m beobachtete, über die einzelnen Spektralfarben gemittelte *typische* Verschiebung der ersten Beugungsordnung gegenüber dem Zentralbild etwa 5 cm, was einem Winkel $\alpha_{1,typ}$ der Größe $5 \cdot 10^{-3}$ im Bogenmaß entspricht und durch ein rund 10-fach vergrößerndes Fernglas noch so gut sichtbar ist, daß man sogar die den einzelnen Spektralfarben entsprechenden Beugungswinkel $\alpha_{1,frb}$ (gerade) noch auflösen kann.

Da ein feines Seidentuch etwa 10 Kettfäden pro Millimeter aufweist, wovon man sich mit Hilfe einer Lupe (und einer feinen Nadel zum Abzählen der Fäden) mit nicht allzu großer Mühe überzeugen kann - die Schußfäden liegen herstellungsbedingt meist etwas weniger dicht beisammen - besitzt unser Beugungsgitter eine charakteristische Gitterkonstante *d* von rund 10^{-4} m; für die Größenordnung der typischen mittleren Lichtwellenlänge λ_{typ} , welche durch das Produkt von Gitterkonstante *d* und (farbgemitteltem) Beugungswinkel der ersten Ordnung $\alpha_{1,typ}$ gegeben ist, gilt daher näherungsweise $\lambda_{typ} = d \cdot \alpha_{1,typ} \approx 5 \cdot 10^{-7}$ m.

Im Fernglas erkennt man auch ganz deutlich die räumliche Anordnung der Spektralfarben in den Beugungsbildern, welche sich mit freiem Auge nur erahnen, aber meist nicht mit Sicherheit feststellen läßt: das rote Beugungsbild ist jeweils am stärksten gegenüber dem Zentralbild verschoben, das - auf Grund des im Vergleich zur Sonne nur halb so heißen Glühfadens sowie der in diesem Bereich geringen spektralen Empfindlichkeit des Auges kaum sichtbare - blaue Beugungsbild am geringsten. Da die Breite des bunten Beugungsstreifens annähernd die gleiche Längenausdehnung quer zu den farbigen Bändern besitzt wie das Loch zwischen dem weißen Zentralbild und dem am wenigsten verschobenen blauen Innenrand dieses Beugungsbildes erster Ordnung, kann man aus der bereits weiter oben diskutierten Tatsache, daß die Bildversetzung durch Beugung direkt proportional der jeweiligen Wellenlänge des entsprechenden farbigen, im Weißlicht vorhandenen spektralreinen Strahlungsanteils ist, sofort den Schluß ziehen, daß diese Wellenlänge von blau nach rot etwa um den Faktor zwei zunimmt.

Umgekehrt ist dann die Frequenz des blauen Lichtes doppelt so groß wie jene des roten, so daß wir unter Verwendung einer Analogie zur Akustik sagen können, daß sich die anscheinend so reichhaltige Welt der reinen Farben bloß über den Bereich einer einzigen Oktave erstreckt! Aus den über drei verschiedene, zum Teil überlappende spektrale Empfindlichkeitskurven (mit dem Maximum im Roten, Grünen und Blauen) aufsummierten Rezeptorantworten produziert die Netzhaut und vor allem das Gehirn dann schließlich jene Fülle von Millionen Farben, welche den goldenen Überfluß der Welt ausmachen.

5.2 Im Anfang war die Kraft: ein improvisiertes Zwischenspiel über den Roten Faden vom Atomkern zum Kosmos

Die Polypeptidfäden der echten Seide sind ein Produkt der Natur, welches uns geholfen hat, die Welleneigenschaften des sichtbaren Lichtes qualitativ und quantitativ, mit einem Wort also physikalisch zu entschlüsseln, wenn wir sie, wie es in einem Stück Gewebe geschieht, in eine zueinander parallele räumliche Anordnung bringen. Wir wollen nun die elektrische Struktur der Atome und Moleküle in einer etwas raffinierteren Weise ausnützen, um solche Strukturen auf natürliche Art und Weise zu realisieren.

Dazu ist es notwendig, einen gewissen Einblick in jene Kräfte der Natur zu gewinnen, welche für den Aufbau von räumlichen Anordnungen verantwortlich sind. Obwohl es auf den ersten Blick eine verwirrende Vielfalt von Kraftwirkungen in der

Natur zu geben scheint, zeigt jedoch ein detaillierteres Studium, daß sich alle beobachtbaren Wechselwirkungen der Natur, die für den Austausch von Energie und Impuls verantwortlich sind, auf drei bindungsfähige Grundtypen sowie eine Quelle der Verwandlung zurückführen lassen:

i) die *Schwerkraft*, welche die Struktur des Universums bestimmt und trotz ihrer extremen relativen Schwäche (1 zu 10^{40} im Vergleich zur elektrischen Kraft) bereits bei einer Massenansammlung von der Größe des Jupiter (Masse $\approx 10^{27}$ kg, also etwa 1‰ der Sonnenmasse, bestehend aus rund 10^{54} Atomen) die durch elektrische Ladungsanziehung gebundenen (Wasserstoff)atome zu einem (elektrisch leitenden) Plasma zerquetschen kann.

Da die Energie und damit auch die Ruhemasse als Quelle der Gravitation eine stets positive Größe darstellt, wirkt die Schwerkraft immer anziehend, während in der elektrisch neutralen Materie (nur für diese kann es zur Bildung von Atomen kommen, weil elektrische Ladungen gleichen Vorzeichens einander im Gegensatz zu schweren Massen ja abstoßen) die viel stärkeren elektrischen Kräfte einander auf größeren Distanzen beinahe so vollständig kompensieren, daß die *effektive Reichweite* der atomaren beziehungsweise molekularen Kräfte *endlich* bleibt.

ii) die *elektromagnetische Kraft*, welche sich bei hohen Energien in Stärke und Struktur untrennbar mit der sogenannten *Schwachen Wechselwirkung* zur *elektroschwachen Kraft* vereinigt. Der geringe Wirkungsquerschnitt dieser Schwachen Kraft bei niederen Energien, der scheinbar aus einer effektiven Kopplungsstärke (oder vielmehr -schwäche von 1 in 10^5 im Vergleich zum Elektromagnetismus) resultiert, kommt in Wirklichkeit nur durch die auf Grund von sehr massiven Austauschbosonen extrem kurze Reichweite eines hundertstel Protondurchmessers zustande.

Allerdings können manche dieser Austauschbosonen auf Grund ihrer nichttrivialen physikalischen Eigenschaften (elektrische und schwache Ladung, schwacher Isospin) zu einer Veränderung der fundamentalen Materieteilchen (Quarks, Elektronen und Neutrinos) führen, zwischen denen sie ausgetauscht werden. Während also die *Schwache Kraft* das Naturprinzip der *Verwandlung* verkörpert, ermöglicht die elektrische Kraft den Aufbau der Materie vom Atom über die chemische Bindung zum Molekül und weiter bis zum Festkörper.

iii) die *Farbkraft*, welche die Quarks zu Hadronen verbindet, und zwar drei Quarks zu Baryonen, Quark-Antiquarkpaare zu Mesonen. Da sich die "Farbe" der Quarks durch den Austausch von "Farbkraftteilchen" oder Gluonen verändert, müssen die Gluonen selbst Farbe besitzen und deshalb aufeinander Kräfte ausüben. Deshalb gibt es für die Farbkraft auch keine lineare Superposition und zwischen ihren Feldlinien herrscht keine effektive Abstoßung wie im sonst analogen - elektrischen Fall, sondern im Gegenteil Anziehung: sie sind parallel und gebündelt wie im Feld eines Kondensators, so daß sich ihre Dichte nicht mit dem räumlichen Abstand der (Farb-)Quellen (= Quarks) ändert.

Deshalb nimmt die potentielle Energie eines Quarkpaares linear mit der Entfernung zwischen den Partnern zu, so daß man das einzelne Quark nicht aus seinem Bindungszustand reißen kann, ohne weitere Quark-Antiquarkpaare zu produzieren. Freie Quarks lassen sich deshalb nicht auf Dauer erzeugen

(oder vernichten), sie bleiben innerhalb der Hadronen eingesperrt, wo man ihre "Existenz" und ihre drittelzahlig gebrochene Ladung durch Streuexperimente zweifelsfrei feststellen kann.

Ebenso wie die elektrische Kraft zwischen neutralen Atomen nicht völlig verschwindet, sondern (auch bei nach dem Pauliprinzip gefüllten "Schalen") zu einer auf Grund von elektrischer Polarisation stets anziehenden *Restwechselwirkung* ("Van der Waals-Kraft") führt - das polarisierende elektrische Feld entsteht dabei durch quantenmechanische Fluktuation -, so verursacht das in der unmittelbaren Umgebung der Baryonen nicht völlig "weißabgegliche" Farbkraftfeld eine stets anziehende Restwechselwirkung, die *starke Kernkraft*, welche Protonen und Neutronen zu Atomkernen vereinigt.

Die beiden anderen Fundamentalkräfte führen dagegen zum *radioaktiven Zerfall* dieser Kerne, und zwar der *elektrische Druck* zwischen den (gleichnamig geladenen) Protonen zum α -Zerfall, die *Verwandlung* von *down-* in *up-quark* (oder vice versa, wenn der Massenunterschied von Neutron und Proton auf Grund von Kernbindungsenergien sein Vorzeichen umkehrt) zur β -Radioaktivität.

Während die Farbkraft auf nukleare Distanzen von wenigen fm (Fermi oder Femtometer = 10^{-15} m) beschränkt bleibt, weil sich das - an sich masselose - Farbfeld durch Selbstwechselwirkung einschnürt und die Gravitation erst für Massen größer oder gleich derjenigen des Jupiter die materiellen Eigenschaften kosmischer Objekte bestimmt, so verdankt die Materie vom einzelnen Atom über das Molekül und die lebende Zelle bis zum makroskopischen Festkörper von der Dimension des Himalaja ihre Struktur dem Wirken der elektrischen Kraft.

Die materielle Basis der menschlichen Lebenswelt ist also im Bereich von Angström bis zu einigen zehn Kilometern ausschließlich elektrischer Natur. Die Entwicklung der lebendigen Substanz hat sich neben der Ausnützung von Festigkeit und Elastizität der elektrisch gestylten Materie - gepaart mit der Möglichkeit des schrittweisen chemischen Auf- und Abbaues, welcher ebenfalls rein elektrische Wurzeln hat -, auch der elektrischen Spannungserzeugung und Stromleitung durch Ionendiffusion in den Nervenzellen bedient. Elektrizität stand also bereits vor Milliarden Jahren an der Wiege des irdischen Lebens, lange bevor Galvani, Volta, Oerstedt, Ohm, Faraday, Maxwell und Siemens diese Naturkraft seit dem Ende des 18. Jahrhunderts für die menschliche Zivilisation nutzbar machen konnten.

5.3 Die spannungsgeladene elektrische Welt der Materie: Von Salzen, Sägen und Seifen

5.3.1 Zucker und Salz - Gott erhalt's!

Wenn wir die Salzkörner, die aus der hin- und herbewegten Salzmühle auf den Dotter unseres Frühstückseis fallen, näher unter die Lupe einer eingehenden geometrischen Analyse nehmen, so müssen wir feststellen, daß sie trotz der rauen mechanischen Behandlung in diesem festkörperphysikalischen Untersuchungsgerät die Regelmäßigkeit ihrer äußeren Form durchaus bewahrt haben: sie erscheinen nach der äußeren Gewaltanwendung wiederum als kleine Würfel genau so wie zuvor. Führen wir denselben Versuch mit Kristallzucker anstelle von Kochsalz durch, so sind die Ausgangskristalle meist schön

ner und regelmäßiger, das Endprodukt nach dem Zermahlen aber ein Staub- oder Puderzucker ohne erkennbare äußere Regelmäßigkeit der Form.

Diese unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften von Salz und Zucker korrelieren mit dem elektrischen Verhalten ihrer wäßrigen Lösungen: wenn wir mit Hilfe eines Kompasses, um den wir etwa hundert Windungen eines dünnen lackisolierten Drahtes gewickelt haben, den Strom messen, der bei der Spannung einer Flachbatterie von 4,5 V durch eine etwas konzentriertere Salzlösung (ein Teelöffel Salz auf einen Viertelliter Wasser) fließt, wenn der Elektrodenabstand einige Zentimeter beträgt, so können wir beim Einschalten einen deutlichen Ausschlag der anfänglich parallel zur Wicklung orientierten Magnetnadel feststellen. Im Falle einer analogen Zuckerkörnung läßt sich kein meßbarer Stromfluß registrieren.

Da der Kurzschlußstrom einer solchen Batterie, der einige Ampere beträgt, einen ähnlichen Ausschlag der Kompaßnadel hervorruft, wenn man den stromführenden Draht einfach längs des Zeigers über den Kompaß legt, beträgt die Stromstärke durch die Salzlösung 1/200 dieses Kurzschlußstroms, also bis zu 10 Milliampere, weil Ober- und Unterseite der Wicklung gleichermaßen zum gesamten Magnetfeld beitragen; dieser Strom kann daher mit einer (roten) Leuchtdiode ebenfalls qualitativ nachgewiesen werden. Offenbar zerfällt das Kochsalz nach der Auflösung im Wasser in einzelne Teilchen mit Nettoladung, sogenannte Ionen, welche den elektrischen Strom transportieren können. Das Zuckermolekül muß hingegen in wäßriger Lösung insgesamt neutral sein, weil es keinen Ladungsfluß bewirkt.

Da die Wassermoleküle mikroskopische elektrische Dipole darstellen und daher durch relativ starke elektrische Kräfte aneinander gebunden sind - der chemisch analoge Schwefelwasserstoff hat kein Dipolmoment, so daß er bei Normalbedingungen gasförmig ist - lösen sich Ionenkristalle wie Kochsalz und elektrisch polare Molekülkristalle wie Zucker gleichermaßen im Wasser auf. Die Tatsache, daß der Ionenkristall aber aus einer periodischen Abfolge von elektrisch geladenen Teilchen besteht, läßt sich außer durch Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in wäßriger Lösung auch mit den mechanischen Eigenschaften des Kristalls gut korrelieren: verschiebt man nämlich zwei flächenhaft aneinander grenzende Teile eines Ionenkristalls mit *abwechselnder* Anordnung von positiven und negativen Ladungen gleicher Größe um eine einzige Gitterkonstante, so stehen einander im Gegensatz zur ursprünglichen Struktur nun *gleichnamige* Ladungen gegenüber, deren elektrische Abstoßung den Kristall längs der ebenen Verschiebungsfläche spaltet, so daß die Kantenrichtungen sowie die Winkel erhalten bleiben. Ionenkristalle sind also spröde und springen bei mechanischer Belastung; sie sind als Ausgangsmaterial für Werkzeuge praktisch nicht verwendbar.

5.3.2 Von der Steinzeit zur Eisenzeit: die physikalischen Wurzeln der menschlichen Kulturgeschichte

Es war vermutlich einer der größten Fortschritte der Zivilisation, als der Mensch zum Zweck der Herstellung von Geräten den überall vorhandenen Stein durch das (wesentlich schwerer zu gewinnende) Metall ersetzen konnte: die negative Ladung

der Elektronen bildet im Metallgitter eine Art Flüssigkeit, die bei jeder äußeren mechanischen Verschiebung der positiven Ionenrümpfe sofort in die entsprechende neue Gleichgewichtslage fließt: Metalle sind verformbar, man kann sie biegen, treiben, bosseln und schmieden.

Damit sie allerdings eine genügende Härte aufweisen, muß man verhindern, daß die Ionenrümpfe nach dem Verformungsprozeß nicht entlang von Gleitebenen weiterrutschen. Das geschieht beim Schmieden (insbesondere des Stahls) dadurch, daß man durch die mechanische Beanspruchung mittels zahlreicher Hammerschläge möglichst viele Gitterversetzungen im Metallgitter erzeugt, die wie Panzersperren ein nachträgliches Abgleiten unter Belastung verhindern sollen.

Betrachtet man die kosmischen Wurzeln der menschlichen Existenz und speziell der Zivilisation, so kommt man aus dem Staunen nicht heraus: Ohne die Festigkeit und Schmiedbarkeit des Eisens ist eine Hochkultur kaum denkbar. Gleichzeitig beruht der Siegeszug der Elektrotechnik ab der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts auf der zusätzlichen Fähigkeit des Eisens, magnetische Felder durch Ausrichtung mikroskopischer Magnete um zwei bis drei Größenordnungen zu verstärken. Alle diese Anwendungen sind aber nur deshalb für die Zivilisation bedeutsam, weil unsere Erde zu einem großen Teil aus Eisen besteht und dieses Metall deshalb häufig und daher auch billig ist.

Der Grund dafür ist aber von den segensreichen Eigenschaften der Atomhülle des Eisens, die für alle bisher genannten Eigenschaften verantwortlich zeichnet, vollkommen unabhängig: er resultiert einzig und allein aus der Eigenschaft des Atomkerns dieses Elements, der die größte Bindungsenergie pro Nukleon aufweist und deshalb das Endprodukt der Kernfusion in allen Sternen bildet: der Eisenkern stellt den nicht weiter recycelbaren kosmischen Müll par excellence dar; seine weite Verbreitung auf der nuklearen Deponie, die unseren Lebensraum bildet, ermöglicht uns ein Leben unter den Auspizien der technischen Zivilisation. Die nächste Zukunft wird uns weisen, ob wir als kosmische Müllmenschen damit leben können oder daran zugrunde gehen werden.

Die lebendige Substanz hat sich zum Aufbau ihrer Strukturen auf die Verwendung der Metalle nicht eingelassen - vermutlich aus Gründen des Umweltschutzes, weil diese Substanzen als reine chemische Elemente nicht so leicht wieder abbaubar und damit recyclingfähig sind. Ihr bevorzugtes Substrat sind die Kohlenstoffverbindungen, deren chemische Variabilität auf Grund ihrer leichten Kombinierbarkeit in der Art eines Molekülbaukastens eine millionenfache Artenvielfalt ermöglicht.

5.3.3 Die elektrische Natur der chemischen Bindung: ein Kapitel angewandter Elektrostatik mit quantenmechanischem Hintergrund

Wie läßt sich die kovalente Bindung zwischen den Elektronenhüllen verschiedener Atome verstehen? Stoßen die negativ geladenen Elektronen einander nicht ab, so daß eine Bindung durch gegenseitiges Eindringen unmöglich erscheint? Stellt man sich ein (Alkali)atom als eine (kugelsymmetrische), räumlich beschränkte und insgesamt neutrale Ladungsverteilung mit praktisch punktförmigem positiv geladenem Zentrum und ausgedehnter negativer Hülle vor, die sowohl das Eindrin-

gen gestattet als auch gegen Störungen weitgehend stabil ist - letztere Eigenschaft kann nur die Quantentheorie vernünftig erklären -, so ergibt sich eine elektrische Anziehung bei gegenseitiger Durchdringung der Atome: tritt die negative Ladung eines Atoms in die kugelsymmetrische Hülle eines anderen ein, so wirkt auf sie nur jenes Feld ein, welches von der Gesamtladung dieses anderen Atoms innerhalb einer Kugel von dessen Zentrum bis zum Aufpunkt der betrachteten Ladung herrührt.

Letztere ist aber stets positiv, wenn die Gesamtladung des ganzen Atoms verschwindet, so daß die Elektronenhülle so lange bis zum Kern des Partneratoms gezogen wird, bis auch der jeweilige Kern in die Hülle des anderen Atoms eindringt, wo er nach dem gleichen Argument wie oben dann elektrisch abgestoßen wird, so daß sich ein Gleichgewicht einstellen muß und eine kovalente Bindung resultiert.

Leider haben wir mit unserer Erklärung nur den Fall des kugelsymmetrischen Wasserstoffatoms und die Bildung seines zwiatomigen Moleküls vernünftig beschrieben, nicht aber die metallische Bindung der ebenfalls kugelsymmetrischen Alkaliatome. Letztere haben aber kein eigentliches punktförmiges positiv geladenes Zentrum, sondern einen Rumpfbereich mit positiver Überschlußladung, in welchen nach dem Paulischen Ausschlußprinzip das Elektron des Partneratoms nicht eindringen kann. Daher stellt sich nicht das weiter oben beschriebene Gleichgewicht ein, sondern die gesamten Rumpfbereiche bleiben außerhalb der fremden Elektronenhülle.

Es gibt also unter diesen Umständen keine elektrische Absättigung durch weitgehende elektrische Neutralisierung und die Bindung kann von allen Seiten her erfolgen, so daß statt einem zwiatomigen Molekül wie beim Wasserstoff im Fall der Alkaliatome eine Art polymeres Riesenmolekül entsteht, dessen Elektronen sich dann letztendlich auf den gesamten Kristallbereich ausdehnen können. Auf diese Weise gelangt man in der Tat auf elektrischem Weg ohne weiteren physikalischen Input zum realistischen Bild eines - sehr weichen und relativ locker gepackten - Metallgitters aus Rumpffionen, die in einer Elektronenflüssigkeit regelmäßig, aber leicht verschiebbar eingebettet sind. Lithium, Natrium und Kalium schwimmen als einzige Metalle auch in kompakter Form auf dem Wasser (mit dem sie natürlich unter Wasserstoffentwicklung sehr heftig chemisch reagieren), wobei Kalium trotz seines schwereren Atomkerns sogar noch spezifisch leichter als Natrium ist, weil sein Rumpffion bei gleicher positiver Überschlußladung einen größeren Radius besitzt: dadurch ist die Feldstärke am Ionenrand und folglich auch die Bindung an das Elektronenfluid geringer, so daß letzteres nicht so stark komprimiert werden kann, weil dadurch die kinetische Energie des Elektroniums (auf Grund der Unbestimmtheitsrelation) zu groß würde.

Ein analoger Effekt macht übrigens die Membran von Nervenzellen semipermeabel und ermöglicht so die Entstehung einer thermischen Diffusionsspannung U in der Größenordnung $U \approx kT/e$ (k = Boltzmannkonstante, T = absolute Temperatur, e = Elementarladung), welche nur von der Zelltemperatur abhängt und für Warmblüter ($T \approx 310$ K) etwa 30 mV beträgt: berücksichtigt man die tatsächlichen Ionenkonzentrationen, deren Verhältnis in U zum Glück aber nur logarithmisch eingeht, so erhält man den tatsächlichen Wert von 70 mV.

Während der Kaliumionenüberschuß des Zellinneren durch die Proteinkanäle in der Membran thermisch nach außen diffundieren kann, verhindert der (etwas) *kleinere* Radius der Natriumionen, daß diese Teilchen aus dem extrazellulären Raum, wo sie in höherer Konzentration vorhanden sind, durch die gleichen Kanäle ins Zellinnere zurückwandern können: die höhere Feldstärke am Rand des kleineren Na^+ -Ions bindet die Dipolmoleküle des Wassers stärker an das (in beiden Fällen einfach positiv geladene) Zentrum, so daß der dickere Mantel aus Wassermolekülen die ursprünglichen Größenverhältnisse der beiden Ionen paradoxerweise gerade umkehrt.

Die hydratisierten Natriumionen passen nun nicht durch die Proteinkanäle der Nervenzelle und die auswärts gerichtete K^+ -Ionendiffusion erzeugt ein negatives elektrisches Potential im Zellinnern, dessen Gleichgewichtswert dann erreicht wird, wenn der resultierende elektrische Strom den Diffusionsstrom gerade kompensiert. In diesem Fall stimmt dann auch die elektrische Energie eU mit der thermischen Energie kT überein, wie es weiter oben behauptet wird.

5.3.4 Die elektrische Schizophrenie der Seifenmoleküle entschlüsselt die Ausdehnung der Atome

Wir haben die Auflösung von Salz und Zucker in Wasser bereits weiter oben als ein grundsätzlich elektrisches Phänomen auf mikroskopisch-atomarer Skala kennengelernt: da das Wassermolekül einen elektrischen Dipol darstellt (dessen Gesamtladung natürlich gleich null ist, sonst würden sich im wahrsten Sinne des Wortes haarsträubende Effekte beim Baden oder Trinken ereignen), umgeben sich sowohl Ionen als auch elektrisch polare, aber insgesamt neutrale Moleküle wie etwa Zucker an ihrer Oberfläche mit einer Wasserhülle. Letztere ist gerade so ausgerichtet, daß entgegengesetzte elektrische Ladungen auf gelöster Substanz und Lösungsmittel einander gegenüberstehen; dadurch wird das Wasser mindestens ebenso stark an das aufgelöste Molekül gebunden wie an andere Wasserteilchen und die Grenzflächenenergie nimmt trotz Vergrößerung der inneren Oberfläche nicht zu, sondern im Gegenteil sogar ab.

Ist das zu lösende Molekül dahingegen auch an jeder einzelnen Stelle im wesentlichen elektrisch neutral, würde beim Lösungsvorgang die Zahl der Wassermoleküle, welche keinem entgegengesetzt geladenen Partner gegenüberstehen, auf Grund der Kontaktflächenzunahme rund um die isolierten gelösten Teilchen über Gebühr anwachsen. Eine solche Lösung wäre (thermodynamisch) nicht stabil und würde spontan in wäßrige Bereiche mit polymeren Dipolketten, die von Gebieten aus unpolaren Molekülen durchsetzt sind, zerfallen: die Substanz reagiert also in diesem Fall wasserabweisend (hydrophob) und ist in Wasser (praktisch) unlöslich.

Beispiele dafür sind etwa die Kohlenwasserstoffe oder die Fette (Triglyzeride), welche Esterverbindungen aus dem dreiwertigen Alkohol des wasserlöslichen Glycerins mit drei Fettsäuren darstellen. Letztere bestehen ihrerseits aus einem praktisch unpolaren Kohlenwasserstoffschwanz, der an einem (schwach) polaren Karbonsäurekopf hängt, sind also gewissermaßen elektrische Zwitter oder Kentauren, halb hydrophil und halb hydrophob. Kocht man Fette mit starker Lauge

(NaOH, KOH) auf, so läßt sich die Esterbindung relativ leicht spalten und es entsteht ein Gemenge aus Glycerin und den Alkalisalzen der jeweiligen Fettsäuren, welches auch unter dem Namen Schmierseife bekannt ist. Das Anion der Fettsäure besitzt gegenüber der letzteren eine noch wesentlich stärker ausgeprägte elektrische Kentaurenstruktur, welche die schillernde Vielfalt der Erscheinungen rund um das Alltagsphänomen Seife auf einfache und zwanglose Weise erklären kann.

Die Seifenmoleküle an der Wasseroberfläche verhalten sich ganz analog den Entchen des bekannten Kinderliedes, welche auf dem See schwimmen: sie stecken ihr negativ geladenes Köpfchen in das polare Wasser, wo es von den positiv polarisierten Wasserstoffatomen dieses Moleküls eingehüllt und festgehalten wird. Deshalb ragen die unpolaren Kohlenwasserstoffschwänze der Seifenmoleküle aus der wäßrigen Oberfläche heraus und bilden eine Art monomolekulare Deckschicht mit wesentlich reduzierter Oberflächenspannung, weil sie ja oberflächlich einem unpolaren Kohlenwasserstoff wie Oktan (vulgo Benzin) mit relativ schwacher elektrischer Wechselwirkung zwischen den Molekülen gleichen. Dadurch dringt die Seifenlösung viel leichter in alle Poren eines zu waschenden Körpers ein.

Durch die Herabsetzung der Grenzflächenenergie lassen sich mit dieser Lösung relativ leicht stabile Membranen oder gar geschlossene Blasen herstellen, die aus einem Wasserfilm mit beidseitiger Deckschicht aus parallelen Kohlenwasserstoffketten bestehen. Will man ihre Lebensdauer verlängern, muß man, etwa durch die Zugabe von wasserlöslichen Substanzen mit niedrigem Dampfdruck wie zum Beispiel Glycerin, die Verdunstung des Wasserfilmes verhindern. Das schillernde Farbenspiel der Seifenblasen ist ein Hinweis darauf, daß ihre Schichtdicke in der Größenordnung der Lichtwellenlängen liegt: hat die an der Hinterseite der Blasenwand mit einem Phasensprung von 180° reflektierte Welle gerade die entgegengesetzte Phase wie das einfallende Licht, so kommt es zur Auslöschung der entsprechenden Teilwelle und die Blase erscheint an dieser Stelle in der Komplementärfarbe der ausgelöschten Wellenlänge. Dazu muß die Stärke der Wand gerade ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge (in Wasser, also $1/1,33 \approx 3/4$ des Vakuumwertes) betragen, weil beim zweimaligen Durchlaufen dann die gleiche Phase wie beim ursprünglichen Einfall auftritt; der Phasensprung an der Hinterseite bewirkt schließlich die destruktive Interferenz. Ist die Schichtdicke größenordnungsmäßig wesentlich geringer als die (halbe) typische Lichtwellenlänge, so führt dieser Phasensprung zur Auslöschung aller Frequenzen und die Seifenblase erscheint über den entsprechenden Bereich hinweg im reflektierten Licht schwarz!

An dieser Stelle soll auf einen Umstand hingewiesen werden, der die gestörte Verbindung von Physik und praktischer Anwendung verdeutlicht: Die Farbe des Lichtes ist, im Gegensatz zur Darstellung in praktisch allen Physikbüchern, nämlich ausschließlich durch seine Frequenz und nicht etwa durch die Wellenlänge bestimmt! Letztere ändert sich nämlich beim Eintritt vom leeren Raum in materielle Körper auf Grund der dort verringerten Ausbreitungsgeschwindigkeit, während die Frequenz des Lichtes in jedem Medium konstant und unverändert bleibt. Die Farbrezeptoren des Auges liegen in der wäßrigen Gallerte des Augapfels eingebettet; in dieser Umgebung sind alle Wellenlängen des sichtbaren Lichtes gegenüber den in der Literatur

angegebenen Vakuumwerten um den Faktor $1/1,33 \approx 3/4$ verkürzt, wobei $1,33 \approx 4/3$ den optischen Brechungsindex des Wassers darstellt.

Da aber die fettlösende Kraft der Oberfläche im Vergleich zum gesamten Volumen der Seifenlösung verschwindend klein ist, kann die Waschwirkung der Seife nur von den Molekülen im Inneren der Flüssigkeit herrühren. Dabei dürfen die hydrophoben Schwänze aber auf keinen Fall mit dem polaren Wasser in Berührung kommen. Die Seifenmoleküle bilden daher kugelförmige Aggregate, sogenannte Mizellen, deren Oberfläche Kontakt zum umgebenden Wasser hat und von den elektrisch geladenen Molekülköpfen gebildet wird.

Die Kohlenwasserstoffketten ragen von dieser Oberfläche radial nach innen, so daß eine Art "Tropfen" aus organischem Lösungsmittel entsteht, dessen äußerer Rand aber hydrophil ist und der deshalb stabil im Wasser verteilt bleibt. Im Tropfeninneren können sich nun nichtpolare Moleküle wie Fette oder andere Kohlenwasserstoffe lösen, ohne daß die Mizellenstruktur dadurch wesentlich verändert wird: Der elektrische Zwitter des Seifenmoleküls kann als wasserlösliche Variante des Benzins angesehen werden und schlägt damit eine Brücke zwischen der anorganischen und der organischen Molekülwelt!

Zum Abschluß wollen wir uns in einem richtiggehenden Küchensexperiment, bei welchem ausschließlich unverdächtige Haushaltsmaterialien - die nicht von kommerziellen Lehrmittelfirmen für trickreiche Demonstrationen speziell präpariert ("gezinkt") wurden - Verwendung finden, eine obere Schranke für die Länge eines "seifenartigen" Moleküls verschaffen. Das Wort "seifenartig" steht dabei für ein "künstliches" Waschmittel (Tensid), obwohl bereits seit der Harnstoffsynthese von Friedrich Wöhler im Jahre 1828 (vier Jahre vor dem Tod Goethes!) zweifelsfrei feststand, daß es keinen Unterschied zwischen der "organischen" Chemie der Biosphäre und der "synthetischen" Chemie des Laboratoriums gibt: Der ohne die okkulte Wirkung einer mutmaßlichen mysteriösen "vis vitalis" hergestellte Retorten-Harnstoff war mit dem Blasen-Harnstoff, den Wöhler in einem Brief an den großen schwedischen Chemiker Jens Jakob *Berzelius* als "in jeder Hinsicht selbst gemacht" bezeichnet hatte, vollständig ident, so daß der leider bis heute überall gebräuchliche Ausdruck "organische" Chemie ein im Grunde genommen irreführendes und eigentlich längst überholtes Vorurteil neu aufwärmt.

Auch wenn heutzutage kein vernünftiger Mensch mehr leugnen kann, daß die Erkenntnisse der Naturwissenschaft in unserem Jahrhundert durch die (wirtschaftlich, aber auch bildungsmäßig bedingte) Konzentration auf eine viel zu eng gefaßte, lokale Optimierung - bis dato eine sehr erfolgreiche Strategie dieser Disziplin - neben kaum anzweifelbaren Verbesserungen auch eine Reihe gewichtiger Beeinträchtigungen für die Qualität des Lebens auf unserem Planeten verursacht haben, so kann uns einzig und allein die Wissenschaft selbst wiederum einen Ausweg aus diesem selbstverschuldeten Schlamassel weisen. Wenn daher, wie viele Anzeichen vermuten lassen, an Stelle der Vernunft mittelalterliche Ängste das Denken und Handeln vor allem der jungen Menschen in immer größerem Ausmaß bestimmen, so sind die lodernen Scheiterhaufen nicht mehr weit, auf denen die Häretiker der Gegenwart schließlich zu landen riskieren, wenn sie noch immer an eine Art Fortschritt glauben.

Das Rad der Zeit innerhalb der naturwissenschaftlichen Erziehung muß zwar mit Sicherheit auf einen neuen, interdisziplinären und ganzheitlichen Kurs gebracht werden, welcher Physik, Chemie und Biologie als untrennbare Einheit ansieht - dreht man es aber ins vor-

industrielle 18. Jahrhundert Rousseaus zurück, so wird es mit großer Wahrscheinlichkeit blockieren und niemand, am allerwenigsten eine angsterzeugende, von der quantitativen Natur der Gegenwartsprobleme zurückschreckende Ideologie der Fortschrittsfeindlichkeit kann es wieder so leicht flott machen und die zum Teil verlorengangene Lebensqualität ohne autosuggestive Selbsttäuschung von Grund auf erneuern und verbessern.

Wir füllen eine runde Schüssel von etwas mehr als 10 cm Radius und ebenem Boden knapp 1 cm hoch mit Wasser. Ist sie aus durchsichtigem Glas oder Kunststoff, so läßt sich das Experiment in recht eindrucksvoller Weise auch auf einem Tageslichtprojektor durchführen, so daß es ganz problemlos sogar einer größeren Zuschauermenge in hoher Detailauflösung demonstriert werden kann.

Um Vorgänge auf der Wasseroberfläche deutlich sichtbar zu machen, bestreuen wir letztere vorsichtig, aber gleichmäßig mit Kinderpuder, wobei größere Aggregate von Puderkörnern (aus Talkum = Magnesiumsilikat) vermieden werden müssen, was am besten mit Hilfe des Tageslichtprojektors zu kontrollieren ist. Mit Hilfe eines handelsüblichen Nähadel-Einfädlers aus dünnem Stahldraht entnehmen wir einer Geschirrspülmittelflasche - oder besser gesagt ihrem Drehverschluß, den wir vorher mit (wenig!) Spülmittel gefüllt haben -, einen möglichst kleinen, annähernd kugelförmigen Tropfen dieser Flüssigkeit. Da die Oberflächenspannung des Spülmittels wesentlich geringer als jene von Wasser ist, gelingt es auch ohne Abschleudern, also lediglich unter Verwendung der Schwerkraft als Ablösehilfe, einen Tropfendurchmesser $d = 2r$ in der Größenordnung eines Millimeters zu erzielen.

Liest man den kleingedruckten Text auf der Spülmittelflasche etwas genauer durch, findet man bezüglich der chemischen Zusammensetzung meist den - gesetzlich vorgeschriebenen - Hinweis: (an)ionische und nichtionische Tenside. Vermutlich bleibt die Bedeutung dieser Information den meisten Menschen - auch bei einer naturwissenschaftlichen Vorbildung im traditionellen lexikalischen Stil - vollständig unklar. (An)ionische Tenside haben, ähnlich wie die Seifenionen, einen negativ geladenen Molekülkopf (meist ein Anion einer - "synthetischen" - Sulfonsäure $H^+R-SO_3^-$, [R = kohlenwasserstoffartiger Molekülrest] an Stelle der Karbonsäure wie bei der Seife), an dem ein (praktisch unpolarer) Kohlenwasserstoffschwanz hängt. Demgegenüber ist der Molekülkopf von nichtionischen Tensiden ungeladen, wirkt aber auf Grund seines wesentlichen elektrischen Dipolmoments hydrophil, allerdings nicht so stark wie das geladene Ion. Nichtionische Tenside sind daher gegenüber den ionischen schaumgebremst und verbessern dadurch die physikalischen Eigenschaften des Abwassers erheblich - die tiefere Einsicht in die elektrische Natur der molekularen Kräfte kann uns sogar helfen, Umweltprobleme zu verringern!

Legt man ein Lineal mit Millimeteerteilung (und *nicht abge-schrägtem* Rand, sonst wird das durchgehende Licht zur Seite gebrochen, erreicht die abbildende Optik nicht und das Bild des Randes erscheint dunkel) auf den Tageslichtprojektor, so kann man bei guter Scharfstellung - die Größe des Tropfens im Schattenbild ziemlich genau vermessen, weil die linearen Dimensionen der Anordnung etwa um den Faktor 10 vergrößert auf dem Projektionsschirm erscheinen.

Taucht man nun den Tropfen an der Spitze des Nähadel-Einfädlers in die Mitte der mit Wasser gefüllten, beduderten Schüssel, so breitet sich das Spülmittel blitzartig auf der Wasseroberfläche aus und verdrängt dabei das Puder, so daß die endgültige Ausdehnung des kreisrunden Spülmittelflecks auf dem Wasser - zumindest in der Overhead-Projektion - sehr

deutlich sichtbar wird. Typischerweise beträgt der Radius R des Spülmittelflecks etwa 10cm, hat sich also gegenüber dem ursprünglichen Tropfenradius r von rund 0,5 mm etwa um den Faktor 200 vergrößert!

Da die Moleküle des Spülmittels im hauchdünnen, kreisrunden Fleck auf der Oberfläche - nach dem weiter oben vorgestellten Bild der Entchen mit den Köpfen unter Wasser und den Schwänzen in der Höhe' - etwa gleich dicht gepackt sein müssen wie im anfänglich annähernd kugelförmigen Tropfen, ergibt sich aus der Gleichheit der Volumina vor und nach der Ausbreitung, daß die Schichtdicke h des Spülmittelflecks demnach $h = 4/3 \cdot r \cdot (r/R)^2$, also rund $1/6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}$ m oder etwa 16 nm betragen muß. Das ist nur etwa 1/30 der typischen Lichtwellenlänge von 500 nm. Aus diesem Grund treten auch keine Interferenzfarben wie bei Seifenblasen auf, wo zwischen einer äußeren und inneren Spülmittelschicht ja noch ein (etwa zehnmal dickerer) Wasserfilm liegt; der Spülmittelfleck erscheint dem Beobachter daher farblos.

Da das charakteristische Seifenanion (*Natrium*)*stearat* aus 18 Kohlenstoffatomen besteht, deren typischer Abstand in einer C-C-Bindung etwa 3 Å, also $3 \cdot 10^{-10}$ m beträgt, erstreckt sich das (sägezahnförmig gewinkelte) Molekül über rund 40 Å oder 4 nm. In der von uns mit den allereinfachsten Mitteln des Haushalts vermessenen Spülmittelschicht liegen also nicht mehr als etwa 4 Moleküllagen übereinander! Nach unserem Entenmodell sollte die Schichtdicke des Spülmittelflecks zwar nur eine einzige Moleküllänge betragen, aber die Ränder der Schüssel behindern unweigerlich die ungestörte Ausbreitung des extrem dünnen Oberflächenfilms, so daß wir auf Grund der Primitivität unserer Meßmethode mit dem Resultat eigentlich recht zufrieden sein können. Seifenhäute sind nicht nur eine Freude für das Auge des homo ludens, sondern entschlüsseln uns auch die Dimensionen der Molekülwelten, wenn wir uns auf das Abenteuer eines atomistischen Random Access Teaching einlassen.

6. Schlußbetrachtungen

Doch die Bedeutung der seifenartigen molekularen Zwitter für das menschliche Leben geht über den affektiven Bereich des sinnlich-lustvollen Spielens wie auch über die in den bunten Kugeln liegende kreative Chance zur kognitiven Entschlüsselung atomarer Mikrostrukturen weit hinaus: hängen am polaren Kopf der elektrischen Kentauren, statt einem einzigen, gleich zwei hydrophobe Kohlenwasserstoffketten - wie das etwa bei der Klasse der Phosphodilipide, fettähnlichen Estern aus dem dreiwertigen Alkohol Glycerin mit zwei (unpolaren) organischen Karbonsäuren und der (elektrisch stark polaren) anorganischen Phosphorsäure der Fall ist -, so verhindert der im Vergleich zur einschwänzigen Seife nun viel voluminösere Doppelschweif die Bildung von kugelförmigen Mizellen im Inneren der wäßrigen Lösung: die nun doppelt so große Zahl von Schwanzspitzen paßt nicht mehr in das Kugelzentrum und die Kentauren ordnen sich, von elektrischen Kräften gesteuert, zu einer flächenhaften Doppelschicht, an deren beiden Außenwänden, welche an das Wasser grenzen, die polaren Molekülköpfe zu liegen kommen.

Der Innenraum wird von den parallel angeordneten, auf Grund ihrer geringen elektrischen Polarität nur relativ schwach trans-

versal und in Längsrichtung aneinander gebunden Kohlenwasserstoff-Doppelketten gebildet; er ist daher gegenüber Deformation oder Durchdringung genau so flexibel wie ein Perlschnurvorhang, der in südlichen Ländern alle Innentüren ersetzt, und konnte dank dieser adaptiven Eigenschaften im Rahmen der frühen Evolution der lebendigen Substanz einen Siegeszug sondergleichen antreten: die elektrischen Kräfte zwischen den Doppelkentauren der Phospholipidmoleküle führten gemäß des Grundprinzips von Anziehung und Abstößung unmittelbar und ohne äußeren Eingriff zur Ausbildung der Zellmembran, der wichtigsten Erfindung des Lebens nach dem Zusammenschluß von Nucleotiden und Aminosäuren zum sogenannten Hyperzyklus.

War es Random Access oder innere Notwendigkeit, welche diesen entscheidenden Schritt der räumlichen Strukturierung verursacht hat? Vielleicht verrät uns die Naturwissenschaft des nächsten Jahrhunderts dieses bisher verborgene Geheimnis, wenn es uns gelingt, das breite Interesse der Menschen an den Grundfragen ihrer eigenen Existenz durch einen entschlackten und problemorientierten naturwissenschaftlichen Unterricht aus dem gegenwärtigen Dornröschenschlaf wieder neu zu erwecken und immer weiter zu entfachen! Es würde jede noch so große Anstrengung gewiß lohnen.

Literatur

- [1] Weisskopf, V.: *Natur im Schaffen, Erkenntnisse der modernen Naturwissenschaft*; Frankfurt/Main: Ullstein 1980 (aus dem Amerikanischen übersetzt, Originaltitel: "Knowledge and Wonder")
- [2] Weisskopf, V.: *Search for Simplicity*; American Journal of Physics, 53(1), January 1985
- [3] Weisskopf, V.: *Search for Simplicity: Quantum mechanics and the Pauli principle*; American Journal of Physics, 53(2), February 1985
- [4] Weisskopf, V.: *Search for Simplicity: Quantum mechanics of the hydrogen atom*; American Journal of Physics, 53(3), March 1985
- [5] Weisskopf, V.: *Search for Simplicity: The molecular bond*; American Journal of Physics, 53 (5), May 1985
- [6] Weisskopf, V.: *Search for Simplicity: Chemical energy*; American Journal of Physics, 53 (6), June 1985
- [7] Weisskopf, V.: *Search for Simplicity: The cohesive energy of solids*; American Journal of Physics, 53(9), September 1985
- [8] Weisskopf, V.: *Search for Simplicity: The metallic bond*; American Journal of Physics, 53(10), October 1985 (für eine - auszugsweise - Übersetzung von [2-8] siehe Physik und Didaktik, Jahrgänge 1987 und 1988)
- [9] Pflug, A. in Kühnelt, H., Berndt, M. et al.: *Proceedings of the GREP'91 International Conference on Physics Education, Teaching about Reference Frames from Copernicus to Einstein, Adventure Games in Einstein's Timespace: Exploring Relativity with a Computer Toolkit*; Torun: Nicholas Copernicus University Press 1992
- [10] Stierstadt, K.: *Physik der Materie*; Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft 1989
- [11] Davies, P., ed.: *The New Physics*; Cambridge: University Press 1989
- [12] Levy-Leblond, J.-M., Balibar, F.: *Quantics - Rudiments of Quantum Physics*; Amsterdam: North Holland 1990
- [13] Wheeler, J.A.: *Gravitation und Raumzeit, die vierdimensionale Ereigniswelt der Relativitätstheorie*; Heidelberg: Spektrum Ver-

- lag 1991 (aus dem Amerikanischen übersetzt, Originaltitel: "A Journey into Gravity and Spacetime")
- [14] Schwinger, J.: *Einsteins Erbe, die Einheit von Raum und Zeit*; Heidelberg: Spektrum Verlag 1987 (aus dem Amerikanischen übersetzt, Originaltitel: "Einstein's Legacy")
- [15] Layzer, D.: *Das Universum, Aufbau, Entdeckungen, Theorien*; Heidelberg: Spektrum Verlag 1986 (aus dem Amerikanischen übersetzt, Originaltitel: "Constructing the universe")
- [16] Atkins, P.W.: *Moleküle, die chemischen Bausteine der Natur*; Heidelberg: Spektrum Verlag 1988 (aus dem Englischen übersetzt, Originaltitel: "Molecules")
- [17] Fischler, H. (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*; Kiel: IPN 1992
- [18] Sexl, R., Schmidt, H.K.: *Raum-Zeit-Relativität*; Braunschweig: Vieweg 1979
- [19] Sexl, R. u. H.: *Weißer Zwerge - Schwarze Löcher*; Braunschweig: Vieweg 1979
- [20] Lanius, K.: *Mikrokosmos - Makrokosmos, das Weltbild der Physik*; München: Beck 1988
- [21] Lederman, L., Schramm, D.: *Vom Quark zum Kosmos, Teilchenphysik als Schlüssel zum Kosmos*; Heidelberg: Spektrum Verlag 1990 (aus dem Englischen übersetzt, Originaltitel: "From quarks to the cosmos")
- [22] Feynman, R.: *QED, die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie*; München: Piper 1988 (aus dem Amerikanischen übersetzt, Originaltitel "The Strange Theory of Light and Matter"; Princeton: University Press 1985)
- [23] Feynman, R.: *Vom Wesen physikalischer Gesetze*; München: Piper 1990 (aus dem Amerikanischen übersetzt, Originaltitel: "The Character of Physical Law"; Cambridge: MIT Press 1967)
- [24] Epstein, L.C.: *Relativitätstheorie anschaulich dargestellt*; Basel: Birkhäuser 1985 (aus dem Amerikanischen übersetzt, Originaltitel: "Relativity visualized"; San Francisco, Insight Press 1988)
- [25] Wolschin, G.: *Spektrum der Physik, Höhepunkte physikalischer und astronomischer Forschung*; Leipzig: J.A. Barth 1992
- [26] Weisskopf, V.: *Die Jahrhundertentdeckung; Quantentheorie*; Frankfurt/Main: Fischer 1992 (aus dem Französischen übersetzt, Originaltitel "La revolution des quanta"; Paris: Hachette 1989)
- [27] Kranzer, W.: *So interessant ist Physik*; Köln: Aulis Verlag 1982
- [28] Landau, L.D., Kitaigorodski, A.I.: *Physik für alle, Moleküle*; Köln: Deubner 1981
- [29] Kitaigorodski, A.I.: *Physik für alle, Elektronen*; Köln: Deubner 1982
- [30] Hawking, Stephen W.: *Eine kurze Geschichte der Zeit, die Suche nach der Urkraft des Universums*; Reinbek: Rowohlt 1988 (aus dem Englischen übersetzt, Originaltitel: "A Brief History of Time"; New York: Bantam Books 1988)
- [31] Hawking, Stephen W.: *Einsteins Traum, Expeditionen an die Grenzen der Raumzeit*; Reinbek: Rowohlt 1993 (aus dem Englischen übersetzt, Originaltitel: "Black Holes and Baby Universes and Other Essays"; New York: Bantam Books 1993)
- [32] Sherwood, M., Sutton, Ch. (Hrsg.): *Physik im Alltag*; Bertelsmann: Gütersloh 1989
- [33] Jargocki, Christopher P.: *Eigentlich klar - oder? Selbstverständliches physikalisch erklärt*; Braunschweig: Vieweg 1986
- [34] Calvani, P.: *Physik und Chemie spielend entdeckt: Abenteuer Wissenschaft*; Köln: Dumont 1990
- [35] Ehrlich, R.: *Turning the World Inside Out*; Princeton: University Press 1990

Fortsetzung der Literaturhinweise auf Seite 28