

# Der menschliche Lebensraum zwischen Atom und Kosmos:

## eine Reise durch Dimensionen und Disziplinen

## Teil I

Alfred Pflug

*Ausgehend vom Prinzip des Random Access Teaching, dessen Idee der komplexen Strukturbildung aus einer linear geordneten Sequenz dem Vorgang der biologischen Enzymsynthese nachgebildet ist, wird eine Standortbestimmung der konventionellen und neu angestrebten physikalischen Inhalte (Quantentheorie und Relativitätstheorie, die in fünf Jahren Disziplinen des vergangenen Jahrhunderts sein werden) im Rahmen des fundamentalen zweidimensionalen Weltbildes aus Geschwindigkeits- und Drehimpulsgröße vollzogen. Dabei löst das quantenmechanische Atomkonzept (Elektronenflüssigkeit mit Formgedächtnis) die paradoxe Annahme von euklidisch invarianten und dabei relativistisch nicht starren Längennormalen (Maßstabshypothese) überraschenderweise in der Analogie zum beliebigen, aber überraschenden Spielzeug des Slimeballs optisch und haptisch auf. Seidentücher entschlüsseln die Wellennatur des Lichtes, während die elektrische Leitfähigkeit einer Kochsalzlösung die atomare Ladungsstruktur und damit die Sprödigkeit der Ionenkristalle erhellt – im Gegensatz zur Verformbarkeit der Metalle, welche in ihrem atomaren Aufbau einer streichfähigen Elektronenmarmelade mit eingelagerten (Frucht)kernen gleichen. Die modellmäßige Elektrifizierung des naiven geometrischen Atommodells der Antike erklärt die anziehende Natur der chemischen Bindung sowie die thermisch-diffusive Spannungsentstehung an einer Nervenzellmembran auf Grund ihrer grobmechanisch zu verstehenden selektiven Durchlässigkeit für verschieden große Ionen mit wäßrigem Taucheranzug. Die schillernde Welt der Seifenblasen gibt einen Hinweis auf die Größe der Atome und die Wellenlänge des Lichtes, gleichzeitig säubert und klärt sie die Struktur molekularer elektrischer Kentauren: letztere verbinden, in einschwänziger Bauart, die ansonst unverträglichen elektrischen Prinzipien von Kohlenwasserstoff und Wasser, während sie mit zwei Schwänzen zur Ausbildung von flexiblen biologischen Perlenschnurvorhängen, vulgo Membranen führen – also gewissermaßen an den Ursprung jenes Random Walk durch die moderne Physik, den wir in Form einer Parforçetour vorexerzieren und auf dessen Beispielcharakter wir trotz aller Schwierigkeiten und Mängel hoffen, um den Physikunterricht im kommenden Jahrhundert aus seinem Dornröschenschlaf zu reißen.*

### 1. Sequentielles Lehren versus Random Access Teaching

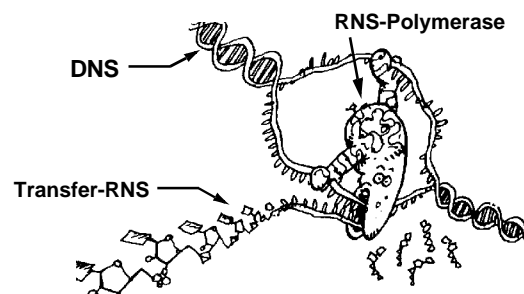
In wenigen Jahren werden Quantenmechanik und Relativitätstheorie, die heute noch als heiliger Gral der mathematischen Abstraktion und gedanklichen Kompliziertheit innerhalb der Physik gelten, Theorien aus dem ersten Viertel des vergangenen Jahrhunderts sein, also ein Stück *Geschichte* dieser Wissenschaft darstellen. Damit erfüllen sie ähnlich den kreativen Menschen, denen frühestens nach ihrem Tode ein für mehrere Generationen bleibendes Denkmal gesetzt wird, die notwendige, aber noch nicht hinreichende Voraussetzung für eine Aufnahme in den Kanon des Physiklehrplans an unseren Schulen.

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

Obwohl die beiden genannten Disziplinen das physikalische Denken des zwanzigsten Jahrhunderts in entscheidender Weise beeinflusst und verändert haben und als Eltern beziehungsweise Großeltern der gegenwärtigen physikalischen Forschung anzusehen sind, steckt die Kunst ihrer gemeinverständlichen Darstellung gegenwärtig noch gänzlich in den Kinderschuhen, so daß selbst eine pubertäre Phase derselben noch Zukunftsmusik ist.

Um den sich abzeichnenden didaktischen Generationenkonflikt in der Vermittlung von Physik abzufangen, soll in der Folge eine Strategie des Zugangs zu aktuellen Fragestellungen dieser Disziplin vorgestellt werden, welche nicht durch den historischen Ballast des systematischen Erkletterns einer Wissenspyramide mit extrem breiter Basis und schwindelnd hoher Spitze belastet ist. Natürlich führt auch zur Physik, ebenso wie zur Mathematik, kein Königsweg, aber vielleicht läßt sich die historische Wendeltreppe, auf der so viele interessierte Laien schon umgekehrt sind, weil das obere Ende beim Aufstieg nicht näher gerückt war, durch einen Panoramalift ersetzen, der schneller und bequemer in höhere Regionen führt und dennoch die wesentlichsten Punkte des Aufstiegs erkennen läßt.

Die Grundidee dieser Entrümpelung der historischen Trassenführung durch die Physiklandschaft folgt einer Strategie, welche die Evolution des Lebens bereits vor vielen hundert Millionen Jahren eingeschlagen hat: der Idee des Enzyms, welches aus einer linearen, eindimensionalen Sequenz von Nucleotiden in streng deterministischer Weise dreidimensionale Proteinstrukturen hervorzaubern kann. Das uralte, im Laufe der Zeit von hundert auf ein(ig)e Milliarde(n) Buchstaben, also von zwei Zeilen auf viele hunderttausend Seiten angewachsene Lehrbuch der Natur, welches von jeder Zelle immer wieder auszugsweise, aber dabei strikt wortgetreu kopiert wird, ist in diesem Fall der lineare Strang der DNS.



aus: *Genetik in Cartoons*, Verlag Paul Parey

Nach ihrer Vorlage ordnet die Transfer-RNS die entsprechenden Aminosäuren anfänglich zu einer Perlenkette mit unterschiedlichen, langgestreckten und querliegenden Perlen an, die sich nach ihrer linearen Polymerisation zum eindimensionalen Polypeptid auf Grund ihrer spezifischen Form mit ganz

bestimmten, im Strang oft relativ weit entfernten Partnern verbinden und die Kette dadurch zu einer dreidimensional-räumlichen Struktur auffalten. Ein ähnliches Modell des Lehrens und Lernens, bei dem sich Bausteine, in unsystematischer zeitlicher Ordnung präsentiert, durch wechselweise inhaltliche Beziehungen im Idealfall quasi wie von selbst zu einem höherdimensionalen Gerüst physikalisch-naturwissenschaftlicher Bildung auffächern, könnte unter Umständen helfen, den Widerspruch zwischen der Neugier nach dem Aktuellen und der Notwendigkeit, die Grundlagen ausreichend zu beherrschen, ein wenig zu mildern oder vielleicht sogar teilweise zu beseitigen.

Jugendliche beiderlei Geschlechts sind im allgemeinen grundsätzlich an den Fragestellungen der Physik sehr interessiert, wenn dieselben sich entweder auf eine altersgemäße Alltagserfahrung (Sport, Verkehr, Musik usw.) beziehen oder einen abenteuerlich-spekulativen Charakter besitzen, der gerade nichtalltägliche Sensationen (Urknall, Supernova, Schwarzes Loch usw.) vermittelt. Dabei steht und fällt der Erfolg des Lehrens mit einem möglichst schnellen, unsystematischen Zugang zu den relevanten Kernproblemen ohne den Ballast weithergeholt und nicht erwarteter oder erwünschter Grundlagen. Statt des bisher üblichen sequentiellen Durchlaufens aller im Vorfeld liegenden Voraussetzungen muß also ein direkter Zugriff auf beliebige Einzelinhalte, also ein *Random Access* zu den Kernbereichen moderner Physik schnell und ohne erheblichen Aufwand möglich sein.

Leider wird dieser Wunschtraum einer höherdimensionalen Struktur naturwissenschaftlicher Einsicht, gepaart mit der Möglichkeit, alle lokalen Inhalte rasch und bequem zu erreichen, durch eine grundlegende physikalische Zwangsbedingung ernsthaft behindert, wenn nicht unmöglich gemacht: der Prozeß des Lehrens muß ja notwendigerweise eine lineare zeitliche Ordnung aufweisen – selbst in den modernen Theorien von Superstrings, welche die Dimension des Raumes ohne größere Hemmungen beliebig aufblähen, bleibt die Zeit eindimensional, weil sich sonst die Kausalstruktur der Raumzeit völlig verändern würde.

Eindimensionale, berandete Mannigfaltigkeiten weisen aber leider stets eine dem Verständnis von komplexen Zusammenhängen hinderliche sequentielle Totalordnung auf, so daß ein entsprechend vernetztes System gegenseitiger Abhängigkeiten und Beeinflussungen darin topologisch nicht eingebettet werden kann. Nicht einmal Buchseite, Overheadfolie oder Wandtafel reichen als flächenhafte Objekte in jedem Fall aus, um beliebig komplizierte Graphen aus Liniennetzen ohne zusätzliche und daher unerwünschte Überkreuzung wiederzugeben – erst in drei Raumdimensionen kann jeder Raumpunkt mit jedem anderen durch eine Linie verbunden werden, die keine andere gegebene Linie schneidet.

Nur wenn die eindimensionalen Mannigfaltigkeiten zufälligerweise geschlossen und daher randlos sind wie der Umfang eines Kreises, gibt es keine behindernde globale Totalordnung; im Falle der Erstreckung in Zeitrichtung aber dann auch keinen "Pfeil der Zeit", dem wir in der makroskopischen Welt – im Gegensatz zur reversiblen mikroskopischen Szenario der Quantenfeldtheorie, wo Teilchen in ihre Vergangenheit zurücklaufen und geschlossene Weltlinienschleifen im Vakuum bilden können – überall begegnen oder zumindest zu begegnen glauben.

Zeitartige Linien sollten daher in der realen makroskopischen Raumzeit diese Eigenschaft der Geschlossenheit sicherheitshalber nicht aufweisen, weil sonst die globale Kausalität durch die Möglichkeit einer Reise in die eigene Vergangenheit in Frage gestellt wird: Kurt

Gödels Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen, welche bei einer einigermaßen realistischen, rotierenden staubförmigen Materieverteilung im Kosmos solche geschlossenen zeitartigen Weltlinien – allerdings nicht als geodätische Linien des freien Falls, sondern mit nicht-gravitativen Beschleunigungen und beträchtlichem Energieaufwand – zuläßt, hat im wahrsten Sinne des Wortes universalen Staub aufgewirbelt. Sie würde nämlich im Prinzip zu denselben existentiellen Verwicklungen führen wie sie im Science-Fiction-Film „Back to the Future“ so unterhaltsam dargestellt werden. Offenbar gibt es also Strukturen, von denen unsere physikalische Schulweisheit träumt, die aber – hoffentlich oder bedauerlicherweise? – weder im Himmel noch auf der Erde existieren!

Sollten sich jedoch geschlossene zeitartige Weltlinien aus der makroskopischen Raumzeit partout nicht entfernen lassen, gibt es einen geometrischen Taschenspielertrick, der die globale Kausalstruktur wieder ins rechte Lot bringt: man splittet die Mannigfaltigkeit längs einer geeignet gewählten chirurgischen Einschnittslinie ähnlich einem ausgezogenen Apfelstrudel in unendlich viele Einzelblätter auf, die wie eine Wendeltreppe Schicht für Schicht hintereinander durchlaufen werden.

Die Mathematiker nennen so etwas *Riemannschen Schnitt* oder *universelle Überlagerung*, in der Physikdidaktik heißt das entsprechende Vorgehen *Spiralcurriculum*. Dabei kehren gewissen Inhalte zwar immer wieder, doch liegen sie in Ebenen unterschiedlicher begrifflicher Abstraktion, so daß der zunehmende intellektuelle Anspruch des dargebotenen Stoffes durch das Bühlersche "Aha"-Erlebnis des "dèja vu" beziehungsweise durch die Einsicht "es ist alles schon einmal dagewesen" wesentlich entschärft wird.

## 2. Die didaktische Landkarte der modernen Physik und ihre weißen Flecken: große Geschwindigkeiten oder kleine Drehimpulse

Das Weltbild der Physik unseres Jahrhunderts läßt sich, wie alle Malereien in der Geschichte der Menschheit bis zur dreidimensionalen Objektkunst der Gegenwart, in einen flächenhaften Koordinatenrahmen bringen. Dieser Rahmen ist allerdings nur in einer Richtung von beschränkter, endlicher Breite, in der anderen Dimension ragt er einseitig bis zu sehr großen Erstreckungen, für die sich nicht ohne weiteres eine klare Grenze angeben läßt, hinaus.

### Fundamentale Naturkonstanten

Lichtgeschwindigkeit..... $c$   
 Plancksches Wirkungsquantum... $h$ ,  
 bzw.  $\hbar/2 = h/4\pi$  ... Einheit des Drehimpulses  
 elektrische Elementarladung..... $e$

Zwei reelle, nichtnegative Zahlen charakterisieren dabei die Lokalisierung jedes physikalischen Phänomens im Bereich von zwei physikalischen Größen, für welche ein absoluter Vergleichswert in Form zweier fundamentaler Naturkonstanten existiert. Diese Größen sind der Betrag der Geschwindigkeit und die Drehimpulskomponente in vorgegebener Richtung; die entsprechenden Konstanten, von denen die eine eine grundsätzliche obere, die andere eine ebensolche untere Grenze darstellt, werden durch die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum – die zugleich auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit aller Änderungen makroskopischer Felder im

leeren Raum bedeutet – sowie das Elementarquantum des Drehimpulses, die sogenannte (reduzierte) Plancksche Konstante  $\hbar$  repräsentiert. Während aber die Bahndrehimpuls-komponenten aller Teilchen der Natur stets nur ein ganzzahliges Vielfaches dieser Größe betragen können, wobei die Null eingeschlossen ist, beträgt der Eigendrehimpuls aller Materieteilchen bezüglich jeder festen Richtung in ihrem jeweiligen Ruhesystem stets die Hälfte dieses Fundamentalwertes, also  $\hbar/2$ . Die Tatsache, daß – außer dem Wert Null – keine kleineren Drehimpulse in der Natur vorkommen können, hängt mit der Dreidimensionalität der Welt zusammen, welche auch, wie bereits erwähnt, die Existenz beliebig komplizierter Verschaltungen von Nervenzellen möglich macht.

Die beiden Verhältniszahlen  $x = v/c = \text{Geschwindigkeitsbetrag/Lichtgeschwindigkeit}$  sowie  $y = L/(\hbar/2) = \text{Drehimpuls-komponente}/(\hbar/2)$ , für welche die Relationen  $0 \leq x \leq 1$  ( $0 \leq x < 1$  für materielle Objekte) sowie  $1 \leq y < \infty$  (mit Ausnahme des Spezialfalles  $L = 0$ ) gelten, bestimmen die Position eines physikalischen Phänomens im weiten Land der grundsätzlichen Möglichkeiten: die *nichtrelativistischen*, makroskopischen Erscheinungen des materiellen Alltags sind durch  $x \ll 1$  (= Geschwindigkeit klein gegenüber Lichtgeschwindigkeit) und den "klassischen" Grenzfall  $y \approx 10^{34} \gg 1$  (Drehimpuls groß gegenüber der Planckschen Konstanten  $\hbar$ ) gekennzeichnet.

Die "astronomisch" große Zahl  $10^{34}$  ergibt sich dabei aus dem Umstand, daß  $\hbar$  im SI-Einheitensystem, welches an den menschlichen Dimensionen orientiert ist, die Größenordnung  $10^{-34}$  besitzt: der typische Drehimpuls eines Menschen – etwa auf dem Wiener Opernball, wo er allerdings ein anderes Vorzeichen als sonst üblich besitzt, nämlich eine Orientierung nach links, die ansonsten in diesem Umfeld höchst selten vorkommt – liegt in diesem anthropomorphen Maßsystem eben gerade in der Nähe der Größe 1.

Da die SI – Masseneinheit 1 kg aber nicht der menschlichen Masse  $m$  von annähernd 100 kg, sondern seiner täglichen Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme angepaßt ist, muß man obigen Umstand auf die Tatsache zurückführen, daß der typische mittlere Trägheitsradius  $r$  seines Körpers nur etwa ein Zehntel der Längeneinheit 1 m entspricht, die ihrerseits etwa durch die Länge des ausgestreckten Armes bis zur gegenüberliegenden Schulter gegeben ist. Da die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  beim Walzertanzen etwas größer als 1 ist, liegt der gesamte Drehimpuls  $L = mr^2\omega$  daher in der Nähe des SI- Wertes von 1.

Üblicherweise wird im Physikunterricht an Schulen wie auch während der Eingangssemester der Hochschulausbildung nur der Bereich der klassischen, makroskopischen nichtrelativistischen Physik, also die linke obere Ecke  $0 \leq x \ll 1, y \gg 1$  des physikalischen Weltbildes näher unter die Lupe genommen. Von der Erwartung der SchülerInnen und Studierenden aus erscheint dieser Bereich, in dem sich die Welt des Alltags abspielt, vielleicht nicht so aufregend wie die mehr abenteuerlichen Gebiete der relativistischen Astrophysik und Kosmologie ( $x \approx 1, y \gg 1$ ) sowie der Atom- und Molekülphysik ( $x \ll 1, y \approx 1$ ). Sollten unsere Jugendlichen über diese Disziplinen der aktuellen physikalischen Forschung wirklich nur aus populärwissenschaftlichen Magazinen wie PM oder Projekt X – Abenteuer in der Wissenschaft erfahren? Wäre es nicht viel eher die Aufgabe der Physikdidaktik im ausgehenden 20. Jahrhundert, hier endlich Alternativen anzubieten – vielleicht sogar mit Hilfe des vorerst noch etwas utopischen Konzepts des

Random Access Teaching? Wie heißt es doch so schön in einem alten Sprichwort: kommt Zeit, kommt **RAT!**

### 3. Atomismus versus Geometrie – eine Jahrtausende alte didaktische Herausforderung wird zum relativistischen Maßstabs-Paradoxon

Obwohl im Grunde genommen bereits eine äußerst fruchtbare Idee der Antike, hat der Nobelpreisträger Richard Feynman, eloquenter Anwalt für eine neue Art des Physiklehrens, den Atomismus als die wichtigste Erkenntnis der Physik unseres Jahrhunderts bezeichnet. Atome sind in ständiger thermischer Bewegung um ihre Gleichgewichtslage, an der die Kräfte zwischen ihnen verschwinden: kommen sie einander zu nahe, werden sie gegenseitig abgestoßen, sind sie zu weit auseinander, zieht sie eine Kraft wieder aufeinander zu.

Während in der Physik des Platon die Eigenschaften der Atome einzelner Elemente durch deren geometrische Struktur als platonische Festkörper mit kontinuierlicher Raumerfüllung festgelegt waren, kann der dreidimensionale Aspekt sowie die Frage nach den mechanischen Eigenschaften als Folge des inneren Aufbaus der Atome erst von der neueren Quantenmechanik in vernünftiger und einigermaßen zufriedenstellender Weise beantwortet werden. Dennoch vermittelt der Physikunterricht – gewollt oder ungewollt – an vielen Stellen vage Vorstellungen über Form, Bauplan und Verhalten der Atome und Moleküle, welche auf Grund der fehlenden Möglichkeiten zur eigenständigen Überprüfung leicht in Mißkonzepte seitens der Lernenden münden können. Für die griechischen Naturphilosophen war die euklidische Geometrie – vom Atom bis zur Gestalt der Himmelsphären – das erste und einzige theoretische Rüstzeug zum Verständnis der Welt. Nachdem es Descartes gelungen war, diese euklidische Geometrie zu algebraisieren und auf die reelle Analysis von Koordinatenwerten zurückzuführen, war der Siegeszug der analytischen Mechanik nicht mehr aufzuhalten. Sie verzichtete auf eine mikroskopisch-geometrische Deutung der Wirkungsausbreitung, wie sie noch Descartes in seiner Theorie der Materiewirbel so anschaulich – für die bildverarbeitende, ganzheitlich organisierte rechte Gehirnhälfte – formuliert hatte, und suchte das Ideal der Naturbeschreibung in der eleganten und möglichst abstrakt-verallgemeinerten mathematischen Formulierung, am liebsten über Wirkungsprinzipien wie etwa jene von d'Alembert, Lagrange oder Maupertuis.

Physik war eine französische Domäne und ein Teilgebiet der Mathematik geworden, ihre Adresse seit der Revolution von 1789 die linke Hemisphäre des Gehirns, ihr Gegenstand der sinnlich erfahrbare Lebensraum des Menschen vor der Bakterienzelle bis zu fremden Galaxien. Der naive und dabei spekulativ-abenteuerliche Atomismus schien als anschauliche geometrische Modellvorstellung gänzlich aus der Mode gekommen zu sein.

Nur der Gigant Isaac Newton besaß den didaktischen Mut, seine speziell zum Zweck des Studiums der Neuen Himmelsmechanik ersonnene Fluxionsrechnung wiederum in der Schublade seines Schreibtisches verschwinden zu lassen, weil er diese neue mathematische Technik dem Leserkreis seiner *Principia* nicht ohne weiteres zumuten wollte. Er formulierte den ganzen Inhalt dieses bahnbrechenden Werkes der Theoretischen Physik in die geometrische Sprache von Sätzen über

Kegelschnitte um, wobei ihm dabei wohl das Glück des Genies hold war: die innere Symmetrie des Keplerschen Problems, welche auf mühevolem, historischem Weg über Lenz, Runge und Wolfgang Pauli erst in unserem Jahrhundert von Vladimir Fock als jene der vierdimensionalen reellen Drehgruppe erkannt wurde, läßt eine solche Geometrisierung in der Tat zu.

In unserem Jahrhundert hat die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie – allerdings erst in der Formulierung von Hermann Minkowski, von der Einstein sagte, er verstehe in dieser neuen Sprache nun seine eigene Theorie nicht mehr – zu einer Wiedergeburt geometrischer Konzepte innerhalb der Physik geführt. Damit die abstrakten Konstruktionen Punkt, Gerade und Ebene aber überhaupt eine Beziehung zur physikalischen Wirklichkeit bekommen können, muß man zunächst die prinzipielle Existenzmöglichkeit von starren materiellen Koordinatengerüsten und invarianten Maßstäben, welche ihre Länge bei Verschiebungen im Raum beibehalten, annehmen.

Genau diese Forderung nach idealisierten, unveränderlichen Strecken, Winkeln und geometrischen Formen steht aber im Widerspruch zu dem relativistischen Postulat nach Endlichkeit, Universalität und raumzeitlicher Konstanz der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer jeglichen Art von Wirkung, insbesondere der Änderungen von Feldern und somit auch der Fortpflanzung des Lichtes im materiefreien Raum.

Geometrie und Feldbegriff scheinen deshalb im Grunde genommen unvereinbare physikalische Konzepte zu sein: ideale relativistische Maßstäbe müssen einerseits die Eigenschaft der Starrheit besitzen, wenn man damit die geometrischen Eigenschaften des Raumes physikalisch bestimmen und quantitativ vermessen können soll; gleichzeitig dürfen sie aber gerade wiederum nicht starr sein, weil andernfalls damit eine unendlich große Signalgeschwindigkeit ermöglicht würde, welche in einer relativistischen Theorie von allem Anfang her in fundamentaler Weise ausgeschlossen ist!

Damit dieses aus der Art der widerspruchsfreien Denkweise geschlagene Kind auch einen Namen hat, wollen wir es *Maßstabsparadoxon* taufen, fragen uns aber dabei aufrichtig: Kann man eine solche, anscheinend in sich selbst widersprüchliche abstrakte Gedankenspielerei unvoreingenommenen Menschen mit gesundem Urteilsvermögen überhaupt näher bringen, geschweige denn plausibel machen?

#### **4. Das Atomkonzept der modernen Quantentheorie als didaktischer Deus ex Machina des Maßstabsparadoxons: Erdapfel oder Slime-Ball?**

An dieser Stelle bietet sich dem leidgeprüften Physiklehrer, den die bisherige Argumentation vermutlich an den Rand der Verzweiflung gebracht hat, eine gänzlich unübliche, überraschende und dabei dennoch sehr hilfreiche didaktische Dramaturgie zur Auflösung des Maßstabsparadoxons an: ein qualitativer Atombegriff, der das flache und deshalb trügerische Bohrsche Karikaturbild von elektronischen Planetenbahnen durch eine dreidimensionale Kontinuumstruktur im platonischen Sinne, aber mit gekrümmten Oberflächen (Kugeln, Linsen, Zigarren usw.) und definiertem elastischem Verhalten (E-Modul  $\approx 10^{12}$  Pa, kritische Energieschwelle für temporär-plastische Verformung einige Elektronvolt pro Atom, bei  $> 10^{11}$  Pa zu elektrisch leitendem Plasmafluid zerquetscht) ersetzt, er-

scheint als relativistischer Deus ex Machina, vom Himmel der eloquenten Überredung fallend, auf der bislang unzureichend ausgeleuchteten didaktischen Bühne.

Im Gegensatz zur üblichen Folklore, daß Quantenmechanik und Relativitätstheorie nur schwer unter den Hut einer übergeordneten (Quantenfeld-)Theorie zu bringen sind, hilft dem Lehrenden wie auch dem Lernenden hier ein anschaulich-modellmäßiges Bild weiter, welches zur Gänze auf den Erkenntnissen der Physik des zweiten Viertels unseres Jahrhunderts beruht: Atome haben nicht nur – wie es das Rastertunnelmikroskop (STM = Scanning Tunneling Microscope) gemäß seinem Entdecker, dem Nobelpreisträger der Physik Gerd Binnig, verrät – die Form von Erdäpfeln, sind also dreidimensionale Strukturen mit – zumindest bei der Beobachtung im STM oder AFM (Atomic Force Microscope = Atomkraftmikroskop) – einigermaßen scharf definiertem Rand, sondern sie gleichen in ihren mechanischen Eigenschaften dem beliebten Kinderspielzeug des *Slime-Balls* (englisch Slime-Ball).

Dieses – haptisch ein wenig ungestüme – Objekt besitzt im Grundzustand, also ohne äußeren Störungseinfluß, eine definierte (Kugel-)Form, läßt sich aber dank seiner schwabbeligen Weichheit, etwa durch einen schwungvollen Wurf an eine (glatte!) senkrechte Wand extrem flach quetschen, so daß es – wie ein hochangeregtes Rydbergatom von Bakteriengröße, das nicht mehr durch die Maschen eines ultrafeinen Siebes paßt – zu einer dünnen Scheibe wird und kurz an der Wand kleben bleibt. Nachdem es einige Sekunden in diesem Zustand erhöhter innerer Spannungsenergie verharrt ist – für ein wirkliches Atom beträgt diese Zeit höchstens  $10^{-8}$  Sekunden -, zieht es sich wieder innerhalb einer ähnlichen Zeitdauer vollständig auf seine ursprüngliche Kugelgestalt zusammen und beginnt dann, an der Wand haftend, dieselbe hinunter zu rollen.

Mit dieser phänomenalen Gedächtnisleistung des kontinuierlichen atomaren Schleims läßt sich nun auch ohne weiteres das relativistische Maßstabsparadoxon auflösen: Atome werden, genau so wie materielle makroskopische Maßstäbe, von äußeren Kräften, wie sie etwa bei im Rahmen von Transportprozessen unvermeidbaren – Beschleunigungen auftreten, deformiert; diese Störung des Ruhezustandes (= Grundzustandes) pflanzt sich natürlich mit Unterlichtgeschwindigkeit quer durch den weichen, schwabbeligen Slime-Ball (der die kontinuierliche Ladungsdichte der Elektronenhülle modellmäßig verkörpern soll) fort. Da aber nach einer gewissen Zeit die überschüssige Energie der Deformation wieder an die Umgebung abgegeben wird, nehmen die Atome und daher auch die aus ihnen aufgebauten makroskopischen Maßstäbe nach einer gewissen Ausheilungsphase ihre exakte ursprüngliche Gestalt und Größe wieder an.

Durch dieses "Zurückfedern" in den Ausgangszustand wird daher eine effektive Invarianz des Atoms oder Maßstabs nach Beendigung der Deformationen gewährleistet, ohne daß dabei eine mit Überlichtgeschwindigkeit verbundene "Starrheit" erforderlich ist. Das Slime-Ball-Modell des Atoms erfüllt damit die scheinbar widersprüchlichen Forderungen der sogenannten relativistischen Maßstabsparadoxon, die im Unterricht kaum je explizit genannt wird, obwohl sie im Grunde genommen eines der wesentlichen begrifflichen Fundamente sowohl der Speziellen wie auch der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellt.