

2. Eine kurze Geschichte der Physik

Erst im Mittelalter vollzog sich im Bewusstsein der Menschen die vollständige Trennung zwischen einer objektiven Außenwelt und einer subjektiven Innenwelt. In der Außenwelt wurde Materie erkannt, die vollständig den Gesetzen der Physik unterlag, während Gedanken, Gefühle, Vorstellungen und Wünsche der Innenwelt zugeschrieben wurden. Das ging ganz natürlich einher mit den mathematischen und physikalischen Erkenntnissen, welche die Grundlage unserer heutigen naturwissenschaftlich-technischen Gesellschaft bilden.

Eine wichtige Zeitmarke ist das Jahr 1687. Da erschienen Newtons Hauptwerk 'Philosophiae naturalis principia mathematica', in denen er seine mathematischen Prinzipien der Naturlehre zusammenfasste. Newton formuliert die drei Bewegungsgesetze der Mechanik, also die bekannten Newtonschen Axiome oder Grundsätze, und sein bereits 1666 gefundenes Gravitationsgesetz. Er konnte damit die Bewegung der Planeten um die Sonne und die Erscheinungen von Ebbe und Flut erklären, sowie Massen des Mondes und der Planeten berechnen. Er stellte weißes Licht durch Spektralfarben dar, untersuchte Farberscheinungen dünner Blättchen, bekannt als Newtonsche Interferenzringe, er begründete die Akustik und bestimmte Frequenzen von Schwingungsvorgängen.

All dies beruhte wesentlich auf den mathematischen Gesetzen der Differential- und Integralrechnung, die er unabhängig von der Leibniz'schen Fluxionsrechnung entwickelt hatte. Dabei wird zum Beispiel die Bewegung eines Massenpunktes in unendlich viele kleine Raum- und Zeitschritte zerlegt, die dann aufsummiert werden können (mathematischer Anhang). Man nennt daher die Differential- und Integralrechnung auch Infinitesimalrechnung.

Durch Newtons Arbeiten wurde Raum endgültig als leerer Container aufgefasst, in dem Objekte existieren und sich bewegen. Ihre Bewegungen unterliegen vollständig der Kausalität, also dem berechenbaren Zwang von Trägheit und Kräfteinflüssen beziehungsweise dem Zusam-

menhang von Ursache und Wirkung. Diese Vorstellung haben wir so verinnerlicht, dass wir heute kaum anders denken können.

Es muss bemerkt werden, dass Newton ein sehr religiöser Mensch war, der in allen Naturerscheinungen allein das Wirken Gottes sah. In seinen eigenen Gesetzen sah er eine Beschreibung der Regelfälle, die in der Natur erscheinen. Er selber hielt sie nicht für zwingende, ewig geltende Auslöser der Phänomene. Für ihn war es immer noch Gott, der die Welt so erscheinen ließ, wie sie erschien und Gott konnte sie so erscheinen lassen, wie es ihm wohl gefiel, unabhängig von aller Mathematik und Kausalität. Die Erkenntnis, dass seine 'Philosophiae naturalis principia mathematica' auch die Grundlage für Atheismus und Materialismus bildete, entsetzte ihn zutiefst und führte ihn in Depressionen (Laurikainen 1988, Fierz 1988).

Die Anfänge eines physikalischen Weltverständnisses liegen weit in der Menschheitsgeschichte zurück, wenn man so will, in der Steinzeit. Damals begannen die Menschen, die Welt in Einzelteilen zu begreifen.

Vielleicht ging es zunächst darum, Beute und Ernte zwischen den einzelnen Gruppenmitgliedern aufzuteilen. Die dazu erforderliche Erkenntnis, dass die Gruppe aus einzelnen Individuen besteht mit individuellen Bedürfnissen, erscheint uns heute als absolut trivial, sie musste jedoch sicher erst irgendwann einmal gewonnen werden. Begriffe vom Einzelnen des Ganzen zu bilden und vor allem sich selber als einen solchen, isolierten Teil zu erkennen, ist ein erster, wichtiger Schritt. Er ist Grundlage der Individualität und gleichzeitig eines physikalischen Weltverständnisses.

Auch heute noch vollzieht sich dieser Schritt im Bewusstsein von Säuglingen und ist Gegenstand soziologischer Forschung (Hooff 1974), (Rössler 2000). Ein neugeborenes Kind erlebt sich und die Umwelt zunächst als ungeteiltes Ganzes. Irgendwann beginnt es, die Mutter und ihre Zuwendungen als etwas von ihm unabhängiges, eigenständiges zu erleben. Es ist zum Individuum geworden.

Mit der Fähigkeit zu unterscheiden und abzuzählen konnten in der Steinzeit auch erste Modelle eines Zeitablaufes entwickelt werden. Vielleicht bestanden diese aus Holzstücken, in die Kerben eingeschnitzt wurden, eine Kerbe für jeden Tag und besondere Kerben für Neumond, Vollmond, den Tag mit dem höchsten Sonnenstand im Jahr und den mit

dem niedersten. Damit ließen sich günstige Jagdzeiten, Saatzeiten und die richtigen Tage für die rituellen Feierlichkeiten bestimmen.

Diese besonderen Fähigkeiten und Kenntnisse hatten immer nur wenige Gruppenmitglieder, die Magier oder Schamanen. Und sie hatten sicher ein anderes Verständnis ihres Vorgehens als wir es heute haben.

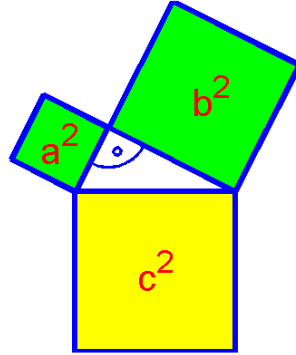
Mit zunehmender Bevölkerungszahl und Kultivierung wurden die organisatorischen Probleme der Menschheit komplexer. Um 3000 v.Chr. musste in den ägyptischen Hochkulturen nach den jährlichen Nilüberschwemmungen das Land neu vermessen und zugeteilt werden, und so entwickelten sich erste Formen von Verwaltung und Geometrie. Ohne die logischen Zusammenhänge zu kennen, wurden Regeln und Methoden der Landvermessung von Generation an Generation weitergegeben.

Erst um 500 v.Chr. machte sich Pythagoras daran, alle diese Regeln und Methoden der ägyptischen und mesopotamischen Geometrie zu sammeln und ein Verständnis derselben zu suchen, so wie wir es uns heute vorstellen. Er gründete die religiös-politische Lebensgemeinschaft der Pythagoreer, welche es sich zur Aufgabe machte, die logischen Zusammenhänge der Geometrie zu erkennen und mathematisch zu beweisen. Ein berühmtes Beispiel ist der pythagoreische Lehrsatz:

Im rechtwinkligen Dreieck ist die Summe der Quadrate über den Katheten a, b (Kathetenquadrate) gleich dem Quadrat über der Hypotenuse c (Hypotenusenquadrat).

Sind a und b die Längen der beiden Katheten, und ist c die Länge der Hypotenuse, so gilt:

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (2-1)$$



Im rechtwinkligen Dreieck ist die Summe der Quadrate über den Katheten b, c (Kathetenquadrate) gleich dem Quadrat über der Hypotenuse a (Hypotenusenquadrat).

Abbildung 2-1

Für die mathematische Beweisführung der geometrischen Lehrsätze musste der Punkt erfunden werden. Das klingt vielleicht etwas merkwürdig, ist aber ganz wichtig für das Verständnis der klassischen und der modernen Physik. Neben Pythagoras haben sich auch Plato, Aristoteles und Euklid intensiv darum bemüht, zu erklären, was ein solcher Punkt ist. Bestehen blieb dann über zwei Jahrtausende Euklids Definition:

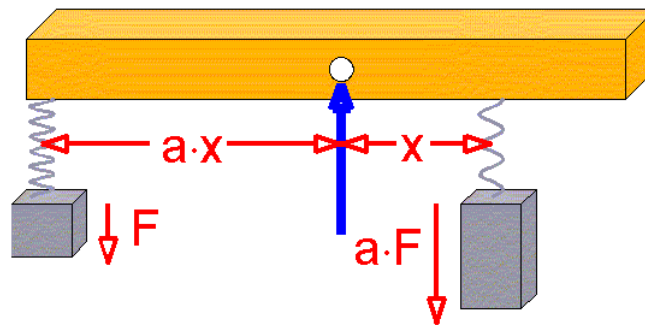
Ein Punkt ist etwas, das keinen Teil hat. (2-2)

Ein Punkt hat keine Ausdehnung, keine Dimension, er nimmt keinen Raum ein. Dieser Punkt ist eine reine Idee, eine Abstraktion, man findet ihn nur in unseren Köpfen als Vorstellung. In der Natur gibt es nirgends etwas, das man nicht noch weiter in seine Bestandteile zerlegen könnte.

Wie wir noch sehen werden, erlaubt der Punkt auf geniale Weise, mathematische Modelle der Welt zu formulieren. Im mathematischen Modell besteht der Raum aus unendlich vielen, unendlich dichten Raumpunkten, die zu bestimmten Zeitpunkten von Punktmassen eingenommen werden (Kapitel 5). Darauf gründet sich unsere Vorstellung von reellen Zahlen, Raum, Zeit und Materie. Da es diesen Punkt in der Natur jedoch nicht gibt, ist es eigentlich klar, dass die mathematischen Modelle für Raum, Zeit und Materie nicht uneingeschränkt gelten können. Die Mathematik erfasst auf geniale Weise ganz bestimmte Aspekte der Natur, nicht jedoch die Natur selber. Das äußert sich dann zum Beispiel in der Relativitätstheorie oder in der Quantenmechanik. Die Unschärferelation

der Quantenmechanik (Kapitel 5) hängt unmittelbar damit zusammen, dass es den Euklidischen Punkt nicht gibt, und Griechen wie Zenon oder Aristoteles erkannten diese Problematik schon sehr früh (Kapitel 4).

Einer der ersten Physiker der Menschheit war Archimedes, der von 285-212 v.Chr. meist in Syrakus lebte. Er konnte bereits krummlinig begrenzte Flächen und das Volumen von Rotationskörpern berechnen. Er entdeckte das Hebelgesetz und das hydrostatische Grundgesetz (wie bekannt ist, in der Badewanne mit dem Ausruf 'heureka'). Er verwandte seine Kenntnisse zur Entwicklung von Flaschenzügen, Schrauben, Wasserschnecken und Katapulten, letztere zur Abwehr feindlicher Belagerer von Syrakus.



Hebelgesetz des Archimedes. Der Balken ist im Gleichgewicht, weil das Produkt aus der Gewichtskraft F mal Länge des Hebelarms x auf beiden Seiten gleich ist: $(ax)F = x(aF)$.

Abbildung 2-2

Viele Jahrhunderte tat sich dann im Bereich der Mathematik und Physik nichts grundlegend Neues. Es wurden Kriegsgeräte entworfen, Bewässerungsanlagen und Thermen gebaut und die Statik großer Gotteshäuser verbessert.

Im Mittelalter wurde dann für die Handels- und Kriegsschifffahrt die Genauigkeit der Zeitmessung stetig erhöht, um den Längengrad der Schiffsposition feststellen zu können. Während der Breitengrad einer bestimmten Position auf der Erde rein lokal aus der Messung des Sonnenstandes und dem Datum im Jahreskalender bestimmt werden kann, folgt der Längengrad nur aus dem Vergleich der wahren Sonnenzeit des betreffenden Ortes mit dem eines Bezugsortes, normalerweise der von Greenwich. Kennt man den Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes, also

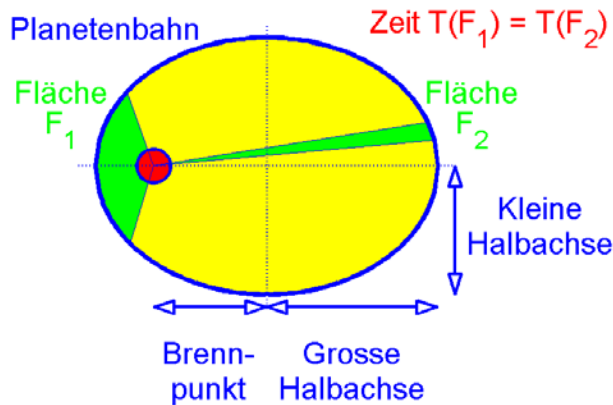
die Mittagszeit eines Ortes auf einer Uhr, die genau die als Weltzeit geltende Greenwich universal time (UT) anzeigt, kann man den momentanen Längengrad angeben. Er ist proportional zur Zeitdifferenz zwischen der zur Mittagszeit angezeigten Ortszeit und 12 Uhr nach UT.

Um diese Zusammenhänge praktisch ausnützen zu können, mussten Uhren entwickelt werden, die auf hoher See, und trotz Hitze, Kälte und Seegang über mehrere Monate hinweg auf wenige Sekunden genau gingen. Bevor es diese Uhren gab, liefen unzählige Schiffe auf Riffe und unzählige Menschenleben und Vermögen gingen verloren. Diese Uhren ermöglichten auch eine neue Ära der Physik.

Galileo Galilei, der in den Jahren 1564 bis 1642 lebte, wird die Einführung genauer Messungen bei Experimenten zugeschrieben, und er gilt damit als Begründer der quantitativen experimentellen Physik. Durch genaue Messung der Periodendauer von Pendelbewegungen und deren Abhängigkeit von der Pendelmasse und der Pendellänge fand er die Pendelgesetze, und auf ähnliche Weise die Gesetze des freien Falls. Berühmt ist Galilei auch als Erfinder des Teleskops, wodurch er zum Vorkämpfer des heliozentrischen Weltbildes wurde. Wie bekannt ist, verwickelte ihn dies auch in schwere Auseinandersetzungen mit der römischen Kirche. Nachdem er am 22.6.1633 dem heliozentrischen Weltbild öffentlich abschwor, soll er den berühmten Ausspruch gemacht haben: 'und sie (die Erde) bewegt sich doch!'

Nach Galilei kam Kepler. Durch die Theorie der Linsen und des Fernrohres mit zwei Konkavlinsen ermöglichte er ganz neue astronomische Beobachtungen. Er erkannte 1605 die Ellipsenform der Marsbahn und formulierte die Gesetze der Planetenbewegung:

1. Die Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht (Kepler-Ellipsen).
2. Die von der Sonne zu einem Planeten gezogene Verbindungslinie (Fahrstrahl) überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Flächensatz).
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen ihrer Bahnellipsen.



Keplerbewegung der Planeten um die Sonne. Die Planeten bewegen sich auf einer Ellipse, in deren einem Brennpunkt (hier links) die Sonne ist. Die Verbindungslinie zwischen Sonne und einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten $T(F_1)$ und $T(F_2)$ gleiche Flächen, zum Beispiel die Flächen F_1 oder F_2 .

Abbildung 2-3

Newton gelang es dann, die Gesetze der Pendelbewegung, des freien Falles und der Planetenbewegung aus drei Axiomen einheitlich mathematisch abzuleiten. Die Axiome umfassen

1. das Trägheitsgesetz: Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung, solange keine Kräfte auf ihn einwirken;
2. das dynamische Grundgesetz: Die Beschleunigung eines Körpers ist der einwirkenden Kraft proportional und ihr gleichgerichtet;
3. das Newtonsche Wechselwirkungsgesetz: Übt ein Körper A auf einen Körper B eine Kraft F_1 aus, so übt stets auch der Körper B auf den Körper A eine Kraft F_2 aus, die von gleichem Betrage, aber entgegengesetzter Richtung ist, $F_1 = -F_2$.

Aus diesen drei Grundgedanken lässt sich das mechanische Verhalten der makroskopischen Materie fast vollständig berechnen¹.

Den Gedanken zugrunde liegt die Vorstellung über einen Raum, in dem jedes Objekt oder jeder Körper zu jeder genau spezifizierbaren Zeit einen genau spezifizierbaren Ort, einen Raumpunkt einnimmt. Der Kör-

¹ Nicht erfasst werden chaotische und quantenmechanische Einflüsse

per bewegt sich, wenn er zu einem späteren Zeitpunkt eine andere Position im Raum einnimmt. Die Bewegung eines Körpers wird durch seine Geschwindigkeit v quantitativ erfasst, indem man einen zurückgelegten Weg Δx durch die dafür benötigte Zeit Δt teilt (Mathematischer Anhang). Beschleunigung a ist die Änderung des Bewegungszustandes, den man wieder so erfasst, dass man die Änderung der Geschwindigkeit Δv durch die Zeit Δt teilt, die für diese Änderung erforderlich war:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad a = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (2-3)$$

Praktisch muss man zur Geschwindigkeitsmessung immer mindestens zweimal zu zwei verschiedenen Zeiten die Position des Körpers feststellen, für die Beschleunigung sogar dreimal. Mit Hilfe der Infinitesimalrechnung (Mathematischer Anhang) konnte Newton bei seinen Berechnungen diesen räumlichen und zeitlichen Abstand Δx und Δt theoretisch unendlich klein machen und so die Bewegung durch Differentialgleichungen (Rieckers und Bräuer 2002) beschreiben:

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}. \quad (2-4)$$

Als Lösungen dieser Differentialgleichung erhält man so genannte Bahnkurven $x(t)$, welche die Position x eines Körpers, vielleicht die eines Planeten oder einer Pendelmass, zum Zeitpunkt t angibt. Dass es solche Bahnkurven gibt, erscheint uns ganz klar und natürlich, wurde aber schon vor zweieinhalbtausend Jahren von dem Griechen Zenon ad absurdum geführt und von Aristoteles tiefsinnig diskutiert (Kapitel 4). Ihre Erkenntnisse finden in der modernen Physik Bestätigung, ganz aktuell zum Beispiel im Quanten-Zenon-Effekt (Misra und Sudarshan 1977, Kwiat Weinfurter Zeilinger 1997).

Die Grundbegriffe der klassischen Physik

Die klassische Physik beruht auf Grundsätzen, die als richtig angesehen werden und die keiner weiteren Beweise bedürfen. Mit solchen axiomatischen Begriffen der Bewegung und der Kraft können alle mechanischen Vorgänge berechnet werden. Es erwiesen sich jedoch weitere Begriffe als nützlich, zum einen für die Lösung komplexer Probleme mit vielen Körpern und komplizierten Kräften, aber auch für ein tieferes Verständnis der so formulierten Axiome.

Zunächst ist die Wirkung, welche eine Kraft auf die Beschleunigung eines Körpers hat, nicht für alle Körper gleich. Sie hängt von der Masse m ab, die den Stoff des Körpers charakterisiert. Ein Körper mit großer Masse widersetzt sich einer Änderung seines Bewegungszustandes. Er ist schwer zu beschleunigen oder abzubremesen. Die Masse m beschreibt die Trägheit oder das Beharrungsvermögen eines Körpers in einem bestimmten Bewegungszustand.

Es bietet sich ferner an, das Produkt aus Geschwindigkeit v und Masse m zum Impuls $p = mv$ des Körpers zusammenzufassen. Ein Körper hat umso mehr Impuls, je größer seine Geschwindigkeit und Masse sind. Ein tieferes Verständnis von Impuls wird sich später noch ergeben (Kapitel 5). Wir werden sehen, dass Impuls immer etwas zu tun hat mit der räumlichen Ausbreitung physikalischer Phänomene und mit der Homogenität, also der Gleichförmigkeit des Raumes: Die Eigenschaften eines Objektes sind an allen Raumpunkten die gleichen.

So wie Impuls die räumlichen Aspekte physikalischer Phänomene verkörpert, so verkörpert Energie die zeitlichen. Zunächst meint Energie E jedoch die Möglichkeit zur Verrichtung von Arbeit A und kann quantitativ mit ihr identifiziert werden: $E = A$. Und Arbeit wird definiert über eine Kraft F , die über eine Strecke Δx auf einen Körper wirkt und ihn dabei vielleicht beschleunigt oder einen Berg hinauf schiebt: $E = A = F\Delta x$.

Je stärker man einen Körper anschiebt und je länger der Weg ist, entlang dem man dies tut, umso größer ist die Bewegungsenergie oder kinetische Energie des Körpers. Je weiter man ihn einen Berg hinauf schiebt, umso größer ist seine Lageenergie. Dieses Verständnis von Energie ergibt sich aus Newtons Axiomen. Wir werden noch sehen, dass Energie sehr viel mit der Homogenität oder Gleichförmigkeit der Zeit² zu tun hat und dass Naturerscheinungen (Phänomene), die sich schnell mit der Zeit ändern, viel Energie zuzuordnen ist.

Die Begriffe Impuls p und Energie E lassen sich im Begriff der Wirkung S vereinen, und diese Wirkung kann als der zentrale Begriff der Theoretischen Physik schlechthin angesehen werden. Rein sprachlich haben wir

² Die zeitliche Abfolge von Naturphänomenen hängt nicht von der absoluten Zeit ab. Zum Beispiel ist die Periodendauer eines Pendels immer die gleiche, solange sich das Pendel nicht ändert.

schon Kraftwirkung angeführt. Eine Kraft wirkt auf einen Körper und ändert seinen Bewegungszustand.

Etwas allgemeiner weisen die Energie und der Impuls eines Körpers darauf hin, welchen Wirkungen er ausgesetzt war. Der Impuls eines Körpers ergibt sich aus der Änderung der Wirkung mit dem Ort und die Energie ergibt sich aus der Änderung mit der Zeit. Der Begriff Wirkung ist recht abstrakt und wir werden uns bemühen (Kapitel 5), mit ihm vertraut zu werden.

Wirkung hat viel mit Kausalität zu tun, also mit dem Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung. Und dieser Zusammenhang ist auch einer der wichtigsten Grundprinzipien unserer bewussten Welterfahrung. Wir erleben nicht nur physikalische Phänomene, sondern überhaupt alles in einem kausalen Zusammenhang. Jede bewusste Erfahrung führen wir auf eine ganz konkrete, erfahrbare Ursache zurück. Selbst ein Dieb führt seine Untaten auf soziale Ungerechtigkeit zurück. Unser gesamter Lebensweg ist eingebettet in einen ständigen Zusammenhang aus Ursache und Wirkung und auf einem solchen Zusammenhang lassen sich auch Newtons Axiome und die Phänomene der klassischen und der modernen Physik begreifen (Kapitel 6).

Der Wandel des Weltbildes im Mittelalter

Die Begriffsschöpfung der Mechanik ging im Mittelalter einher mit einer gewaltigen Wandlung des menschlichen Welterlebens. Wolfgang Pauli, einer der großen Schöpfer der Quantenmechanik, hat diesen Wandel im Welterleben in vielen Aufsätzen genau untersucht (Laurikainen 1988, Meier 1992, Jung und Pauli 1952, Atmanspacher, Primas und Wertenschlag-Birkhäuser 1995)

Im Mittelalter wurde die Welt als Einheit aus Form und Materie erlebt. Materie bestand nicht aus sich selbst heraus. Sie wurde verstanden als eine Möglichkeit der Seele, sich mit verschiedenen Formen zu verbinden und dadurch die verschiedenen Dinge zu schaffen.

Die Grundformen der Materie waren die vier Elemente: Erde, Wasser, Luft und Feuer. Jede Grundform hatte ihre eigene Sphäre. Die Erde war unten, dem Zentrum des Universums am nächsten. Die Erdsphäre war von der Wassersphäre umschlossen, außerhalb gab es die Luftsphäre und schließlich als äußerste Grenze die Sphäre des Feuers. Objekte, die viel

Erde enthielten, hatten eine Tendenz nach unten, Objekte mit viel Luft eine nach oben. Die Beschreibung der Natur war qualitativ.

In der Renaissance wuchs die Überzeugung, dass alle Änderungen durch mathematische Gesetze beschrieben werden können. Man vertraute immer mehr der sinnlichen Beobachtung und Messung und entwickelte empirische Untersuchungsmethoden. Die Beobachtungsmethoden und die mathematische Präzision entwickelten sich Hand in Hand zur Naturwissenschaft.

Die platonische Welt der Ideen fand nun ihren Ausdruck auch in der Welt der Erscheinungen. Alle Veränderungen der Erscheinungen wurden durch invariante, mathematische Gesetze geregelt. Die logische Struktur der Ideenwelt fand ihren Ausdruck in den mathematischen Beziehungen zwischen den Erscheinungen. Als Folge wurde alles Irrationale in der Natur abgeschafft. Es wurde nichts mehr anerkannt, das nicht durch Rationalität geregelt wurde und von der Vernunft erfasst werden konnte.

Dieses neue Konzept wurde der Kern der neuen, wissenschaftlichen Methoden. Die Idee einer absoluten Kausalität wurde anerkannt, alle Veränderungen ergaben sich aus exakten, mathematischen Gesetzmäßigkeiten: 'Nichts geschieht ohne Grund'.

Daraus folgte unmittelbar der Determinismus. Für einen Laplace'schen Dämon, der alle Anfangswerte aller Körper kannte, war die Entwicklung der Welt zumindest im Prinzip berechenbar, im Wesentlichen auf der Grundlage der oben aufgeführten Newtonschen Axiome.

Goethes Kritik am naturwissenschaftlichen Weltbild

Gegen das sich so entwickelnde Weltbild gab es natürlich heftigste Widerstände und Kritik. Sehr bekannt ist die Polemik Goethes gegen Newton, die in Goethes 'Entwurf einer Farbenlehre' und 'Enthüllung der Newtonschen Theorie', beide von 1810, geäußert werden.

Danach treten in der neuen, mechanischen Weltsicht wenige Aspekte unserer Welterfahrung in den Vordergrund. Anstelle von Wahrnehmungsinhalten treten Vorstellungen ins Zentrum des wissenschaftlichen Interesses. Die Auswahl geschieht durch das, was mathematisch beschreibbar, also besonders einfach ist. Materie und deren Bewegung in

Raum und Zeit erscheinen als die letzten Begriffe, auf welche die Mannigfaltigkeit der Naturerscheinungen bezogen werden muss.

Dabei weist Goethe bereits darauf hin, dass zum Beispiel Raum und Zeit Elemente der Vorstellung sind, also innere Bilder, Ideen oder Gedankenkonstruktionen. Es sind nicht Elemente der Anschauung, die visuell oder auf andere sinnliche Weise erfasst werden können. Die mathematischen Modelle werden mit der Wirklichkeit identifiziert. Man spricht von naturwissenschaftlichem Illusionismus.

Zum Beispiel wird das, was als Licht wahrgenommen wird, durch einen Bewegungsvorgang erklärt, der durch eine mathematische Formel ausgedrückt werden kann. Wenn eine Farbe in Erscheinung tritt, wird sie auf eine schwingende Bewegung zurückgeführt und deren Frequenz berechnet. Man glaubt, damit die bewusste Erfahrung erklärt zu haben. Wo die Naturvorgänge in die Mechanik der Atome aufgelöst werden können, ist unser Kausalitätsbedürfnis vorläufig befriedigt.

Nach Goethe hat Licht jedoch nicht unmittelbar etwas mit Materie zu tun, Licht ist etwas jenseits der Welt unserer bewussten Erfahrung. Es äußert sich in jedem Bereich der Wirklichkeit auf die dem Bereich entsprechende Weise. In der Materie vielleicht in einer schwingenden Bewegung, auf der Retina des Auges als chemischer Prozess, im Kortex als elektrochemische Neuronenerregung und im Bewusstsein als Helligkeit und Farbe.

Die Natur des Lichtes selber, sein Wesen, kann nicht durch mathematische Ausdrücke erfasst werden. Man kann sich ihr annähern, indem man aller Erscheinungsformen des Lichtes gewahr wird, so wie Goethe in seiner Farbenlehre.

Newton findet, dass Licht aus farbigen Lichtern zusammengesetzt ist. Nach Goethe ist dies ein Ergebnis unrichtiger Spekulation, die Folge einer Verwechslung der mathematischen Modelle mit der Wirklichkeit. Licht sei das einfachste, unzerlegteste, homogenste Wesen, das wir kennen. Alle Aussagen über Zusammensetzung des Lichtes sind ja nur Aussagen über willkürliche mathematische Modelle³.

Farbe entsteht, wenn Licht durch Finsternis modifiziert wird. Weißes Licht erscheint im trüben Medium gelb, Finsternis erscheint im trüben

³ In der Physik wird Licht je nach Modellvorstellung angesehen als Strahl, Welle, Teilchen, elektromagnetisches Feld oder Wirkungsquantum.

Medium blau, wie der Himmel. Dabei ist auch das menschliche Auge nicht wegzudenken:

*Wär nicht das Auge sonnenhaft,
Wie könnten wir das Licht erblicken?
Lebt nicht in uns des Gottes eigne Kraft,
Wie könnt' uns Göttliches entzücken?*

Goethe 1810, Entwurf einer Farbenlehre, Einleitung

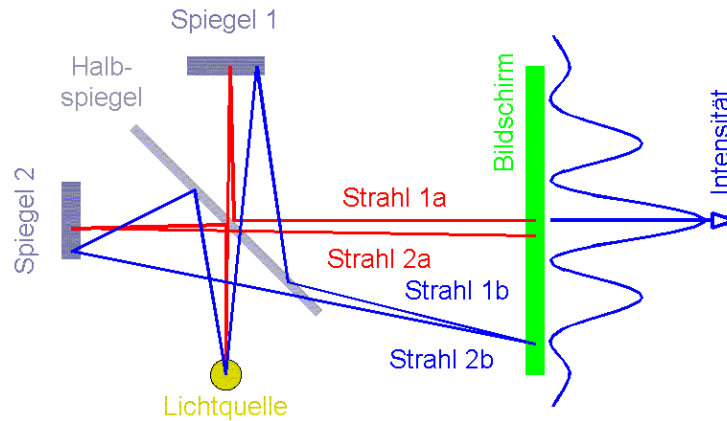
Drückt man mit der Hand kräftig auf das geschlossene Auge, so erscheinen in unserer Wahrnehmung alle Farben, die erlebt werden können. Das Erlebnis hängt unmittelbar mit dem Auge zusammen. Aber auch das Auge bedingt nicht die Farbe, es ist nur mit eine der Ursachen von Farberscheinungen.

Ein neues Weltverständnis kündigt sich an

Es ist frappierend, wie Goethes Kritik an der klassischen Physik durch Relativitätstheorie, Quantenmechanik und Chaostheorie eine Bestätigung finden. Die herkömmlichen Vorstellungen über die Natur des Lichtes und des Raumes wurden zum Beispiel durch das berühmte Experiment von Michelson zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit und Einsteins Relativitätstheorie grundlegend über den Haufen geworfen.

Michelson wies mit seinem Interferometer experimentell nach, dass die Lichtgeschwindigkeit in einem ruhenden und in einem gleichförmig bewegten Bezugssystem nach allen Richtungen gleich ist. Dafür erhielt er im Jahre 1907 den Nobelpreis für Physik.

Wie in Abbildung 2-4 skizziert, besteht ein Michelson-Interferometer aus einem halbdurchlässigen Spiegel, zwei Umlenkspiegeln und einem Bildschirm. Eine Lichtquelle bestrahlt den halbdurchlässigen Spiegel und diese Wirkung wird über zwei verschiedene Umlenkspiegel 1 und 2 auf den Bildschirm geführt. Die beiden unterschiedlichen Wirkungen der Spiegel überlagern sich dort und es entstehen konstruktive und destruktive Interferenzstreifen.



Michelson Interferometer: Die Wirkung einer Lichtquelle wird durch einen halbdurchlässigen Spiegel aufgeteilt und über Umlenkspiegel 1 und 2 auf einen Bildschirm geleitet. Dort findet man ein Interferenzmuster, also Streifen großer Lichtintensität und dazwischen Dunkelheit.

Abbildung 2-4

Der Ausbreitung von Lichtwirkungen kann eine Wellenlänge zugeordnet werden. Ist der Wegunterschied zwischen der Lichtquelle über die beiden verschiedenen Spiegel zum Bildschirm gerade ein ganzzahlig vielfaches dieser Wellenlänge, so ergibt sich eine hohe Intensität der Lichterscheinung auf dem Bildschirm. Dies ist in Abbildung 2-4 für die Strahlen 1a und 2a der Fall. Ist der Wegunterschied ein ganzzahlig vielfaches plus oder minus einer halben Wellenlänge, so heben sich die beiden Beiträge der Wirkungen gegenseitig auf. An solchen Stellen des Bildschirms ist kein Licht wahrnehmbar. Mit seinem historischen Experiment wollte Michelson die Geschwindigkeit der Erde gegen das Bezugssystem der Lichtausbreitung, nämlich den hypothetischen Äther, bestimmen.

Wie auch beim Michelson-Interferometer offensichtlich wird, ist die Ausbreitung von Lichtwirkungen vergleichbar mit Wellen in einem Medium, zum Beispiel in Wasser oder Luft. Wie bei der Wellenausbreitung in Wasser oder Luft kann man auch der Ausbreitung von Lichtwirkungen eine Wellenlänge zuordnen und Interferenzmuster beobachten. Es erschien daher klar, dass auch die Lichtausbreitung auf der Wellenbewegung eines Mediums beruhte, ganz entsprechend den Wasserwellen oder Luftdruckwellen. Das hypothetische Medium der Lichtausbreitung war der sonst nicht wahrnehmbare Äther.

Da sich nun die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne relativ schnell bewegt, sollte sich die Lichtgeschwindigkeit in Richtung dieser Bewegung merklich von der in dazu senkrechter Richtung unterscheiden. Für diesen Nachweis entwickelte Michelson das Interferometer.

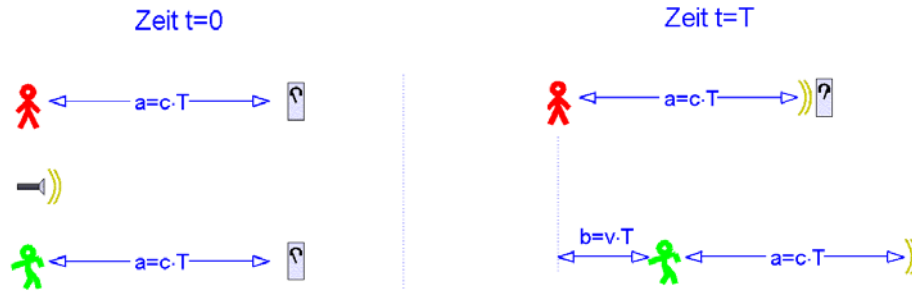
Wurde das Interferometer so aufgestellt, dass die Linie durch Spiegel 2 und Bildschirm gerade in die Bewegungsrichtung der Erde zeigte, so sollte die Ausbreitung der Lichtwellen langsamer sein als in der dazu senkrechten Richtung. Jeder Wellenberg des Äthers sollte daher den Bildschirm etwas später erreichen, so dass die Maxima des Interferenzmusters etwas verschoben sein sollten im Vergleich zu einem im Äther ruhenden Interferometer. Nach der Äthertheorie muss die Lage der Maxima und Minima des Interferenzmusters auf dem Bildschirm des Interferometers von der Orientierung des Gerätes zur Bewegungsrichtung oder von der Position der Erde auf ihrem Umlaufbahn um die Sonne abhängen. Dies ist jedoch in Wirklichkeit nicht der Fall.

In diesem und in vielen anderen und moderneren Experimenten kommt man immer zum selben Schluss. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtwirkungen c ist absolut unabhängig von der Bewegung des experimentellen Aufbaus relativ zu irgendeinem sich gleichförmig bewegenden Bezugssystem. Daraus folgt, dass der Ausbreitung von Lichtwirkungen keine Schwingung eines Mediums wie Wasser, Luft oder Äther zugrunde liegen kann.

Es ist sogar so, dass zwei Beobachter in ein und demselben Experiment auch dann zur selben Ausbreitungsgeschwindigkeit c von Lichtwirkungen kommen, wenn sie sich relativ zueinander mit einer Geschwindigkeit v bewegen. Nach den konventionellen Vorstellungen über Raum und Zeit würde der erste Beobachter die Lichtgeschwindigkeit c_1 und der andere die Lichtgeschwindigkeit c_2 messen und der Unterschied müsste die Relativgeschwindigkeit der Beobachter sein. Das ist aber nicht der Fall, vielmehr findet man experimentell

$$c_2 = c_1 \neq c_1 + v \quad (2-5)$$

Damit ist die Vorstellung eines absoluten Rahmens von Raum und Zeit, in dem wir Menschen gemeinsam existieren und die Welt erleben, ad absurdum geführt.



Ein ruhender und ein bewegter Beobachter senden im Moment ihrer Begegnung (links) gemeinsam ein Lichtsignal aus. Nach der Zeit T legt dieses Signal die Strecke $a=cT$ zurück, und zwar im Bezugssystem des Ruhenden als auch in dem des Bewegten. Gleichzeitig haben sich die beiden Beobachter jedoch auch noch voneinander entfernt. In einer absoluten oder gemeinsamen Raumzeit ist dies unmöglich.

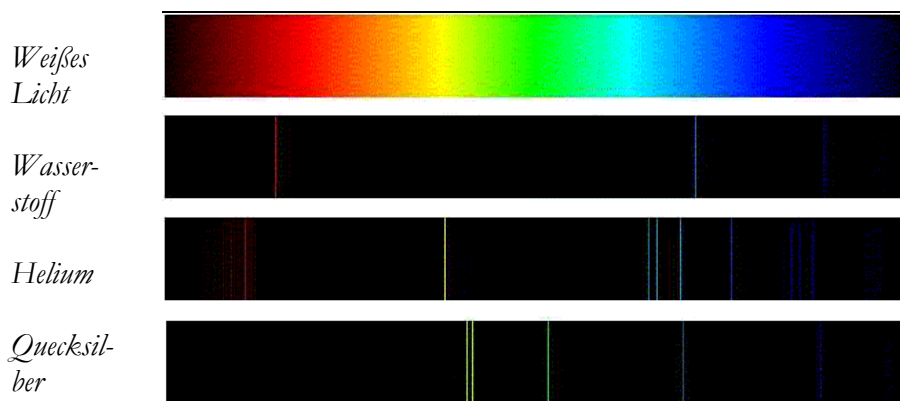
Abbildung 2-5

Auch in anderen Bereichen der Physik kündigte sich etwa zur selben Zeit ein grundsätzlicher Verständniswandel an (Bräuer 2000). Es stellte sich heraus, dass physikalische Wirkungen nicht beliebig klein werden konnten, sondern dass es eine untere Grenze gibt, das so genannte Plancksche Wirkungsquantum h .

In der Atomphysik äußerte sich dies in diskreten Linienspektren. Glühende Gase senden Licht aus, das man durch ein Prisma lenken und auf einen Bildschirm werfen kann. Man findet dann wider erwarten kein kontinuierliches Bild aller Spektralfarben, sondern nur wenige, diskrete Spektrallinien. In Abbildung 2-6 sind verschiedene Spektren im Vergleich zum Spektrum weißen Lichtes wiedergeben.

Auf der Grundlage der klassischen Physik musste man erwarten, dass Elektronen auf ihrer Bahn um die Atomkerne kontinuierlich Licht an die Umgebung abgeben würden. Dabei müsste sich ihre Bewegungsenergie verbrauchen und es sollte zu einem Sturz der Elektronen in die Atomkerne kommen. Nach Newtons klassischen Gesetzen der Mechanik konnten Atome nicht stabil sein.

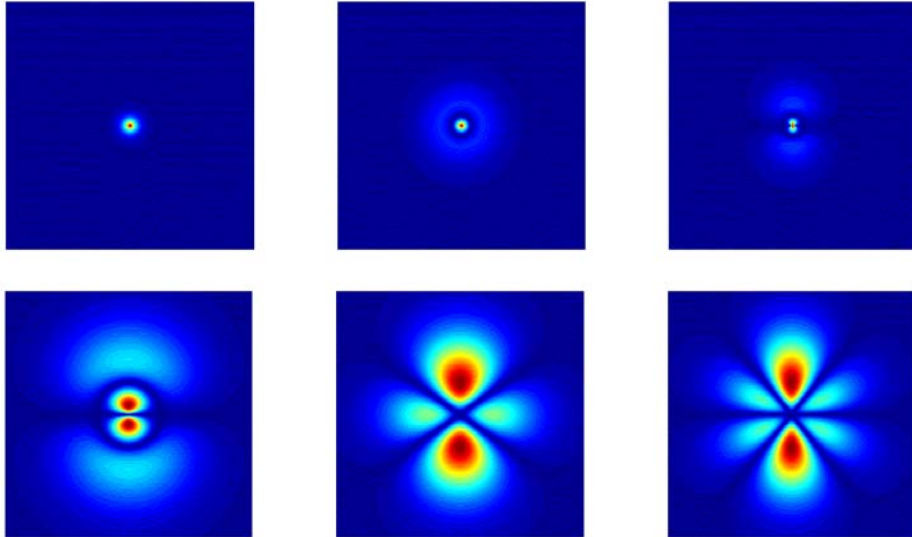
Mit kontinuierlich abnehmender Energie müsste sich auch die Frequenz des von den Elektronen abgestrahlten Lichtes kontinuierlich ändern und das Lichtspektrum glühender Gase würde kontinuierlich sein, wie das des weißen Lichtes. Die Experimente zeigten jedoch, dass das nicht der Fall ist.



Atomspektren: Das Licht glühender Gase wird durch ein Prisma auf einen Bildschirm geleitet. Es zeigen sich Linien, die Schlüsse auf die Struktur der Atomhülle erlauben. Im Vergleich dazu ist oben das Spektrum von weißem Licht zu sehen. Würden Elektronen auf klassischen Bahnkurven um den Atomkern kreisen, würden alle Atome ein kontinuierliches Spektrum wie beim weißen Licht oben erzeugen

Abbildung 2-6

Die einzig mögliche Schlussfolgerung, die in diesem Zusammenhang zum ersten Mal Bohr im Rahmen seines Atommodells von 1913 zog, war, dass die Elektronen sich nicht auf Bahnen kontinuierlicher Wirkung um die Atomkerne bewegen, sondern dass sie Zustände mit diskreten Wirkungswerten einnehmen. Im Atom werden die Grenzen der scheinbaren Kontinuität von Raum, Zeit und Wirkung erreicht.



Elektronenzustände in Atomen: Elektronen umkreisen die Atomkerne nicht so wie Planeten die Sonne umkreisen. Sie können nur ganz bestimmte Zustände diskreter Wirkung einnehmen. Hier sind sechs Zustände gezeigt, wobei der Grauton (oder die Farbe) die Wahrscheinlichkeit charakterisiert, an der entsprechenden Position eine Wirkung zu finden, zum Beispiel eine Ablenkung beim Beschuss mit anderen Elektronen.

Abbildung 2-7

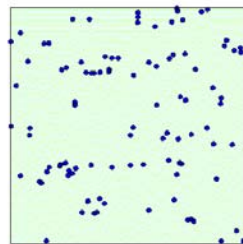
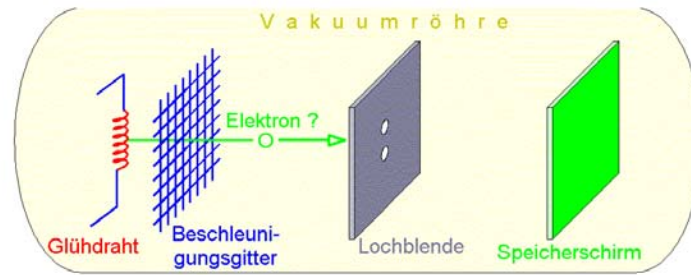
Weiterführende Experimente stellten sogar die Existenz des Elektrons als klassisches Teilchen in Frage. Eines ist das so genannte Doppelspaltexperiment, das in Abbildung 2-8 aufgezeichnet ist. Es wurde im Jahre 2002 von der englischen physikalischen Gesellschaft in "Physics World" zum schönsten Experiment aller Zeiten ernannt. Durchgeführt hatte es Prof. Claus Jönsson im Rahmen seiner Doktorarbeit von 1961 in Tübingen am Institut für Angewandte Physik.

Wie in Abbildung 2-8 befindet sich in einem Vakuumgefäß ein Glühdraht, der unseren Vorstellungen gemäß Elektronen ins Vakuum emittiert. Diese werden durch ein elektrisches Feld zwischen Glühdraht und einem Beschleunigungsgitter auf eine Lochblende gelenkt. Hinter der Lochblende befindet sich ein Speicherschirm, auf dem die Wirkungen des Versuchsaufbaues beobachtet werden können.

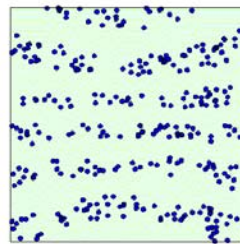
Für das Experiment muss die Temperatur des Glühdrahtes sehr sorgfältig reguliert werden. Dann nämlich kommen sehr wenige Elektronen aus

dem Glühdraht und dementsprechend kann man den Erwartungen gemäß einzelne Elektroneneinschläge auf dem Speicherschirm beobachten. Nach kurzer Zeit sieht der Bildschirm etwa so wie in Abbildung 2-8 unten links aus. Scheinbar haben knapp hundert Elektronen ihren Weg vom Glühdraht durch eines der Blendenlöcher bis zum Schirm gefunden. Diese entspricht ganz den klassischen Erwartungen.

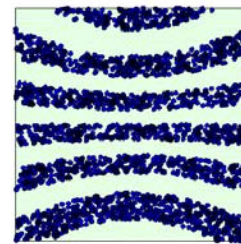
Wartet man nun aber etwas länger, so bilden die Einschläge aller Elektronen zusammen ein typisches Interferenzmuster mit Streifen hoher Einschlagdichte und dazwischen Streifen ganz ohne Einschläge. Die Anordnung der Streifen lässt den Rückschluss zu auf eine Welle ganz bestimmter Länge, die sich vom Glühdraht über die Lochblende bis hin zum Bildschirm ausbreitet und dort wegen der beiden Löcher konstruktive und destruktive Interferenzen erleidet.



Speicherschirm nach 1 Sek.



Speicherschirm nach 3 Sek.



Speicherschirm nach 25 Sek.

Doppelspaltexperiment: In einer Vakuumröhre werden von einem Glühdraht Elektronen abgegeben. Deren Wirkung gelangt durch ein Beschleunigungsgitter und eine Blende mit zwei Löchern auf einen Speicherschirm. Dort können in großen zeitlichen Abständen die Einschläge einzelner Elektronen beobachtet werden. Viele solcher voneinander unabhängiger Wirkungen bilden wie unten rechts ein typisches Interferenzmuster.

Abbildung 2-8

Das ist nun das Problem für unser klassisches Weltbild. Zum einen sieht es so aus, als bewegten sich Elektronen wie kleine Teilchen vom Glühdraht zum Schirm um dort Energie, Impuls, Masse und Ladung sichtbar abzugeben. Zum anderen sieht es aber auch so aus, als breite sich eine Welle aus, die wegen den beiden Blendenlöchern auf dem Schirm mit sich selber interferiert. Es ist klar, dass sich beide Vorstellungen widersprechen.

Liegen der Beobachtung Teilchenbewegungen zugrunde, dann ist das Interferenzmuster nicht zu erklären. Die Einschläge werden ja einzeln beobachtet und ein Teilchen kann sich immer nur durch ein einziges Blendenloch bewegen. Liegt der Beobachtung jedoch eine Wellenausbreitung zugrunde, so dürften auf dem Schirm keine einzelnen Einschlä-

ge beobachtbar sein, das Interferenzmuster müsste sich mit der Zeit gleichmäßig auf dem Schirm entwickeln, so wie wenn man den Helligkeitsregler eines Fernsehgerätes langsam hochdreht und damit das Fernsehbild immer deutlicher und deutlicher erkennbar macht.

Die einzige Schlussfolgerung, welche dieses Experiment zulässt, wurde von Niels Bohr (Bohr 1930) so formuliert:

There is no quantum world!

Aus unserer täglichen, bewussten Welterfahrung haben wir einen Begriff sowohl von Teilchen als auch von Wellen. Diese Begriffe projizieren wir auf den Bereich zwischen Glühdraht und Schirm des Doppelspaltexperiments. Tatsächlich nehmen wir in diesem Bereich gar nichts wahr. Wir haben eine bewusste Erfahrung des Glühdrahtes und des Schirmes, der Rest sind Vorstellungen, Gedanken und Interpretationen. Und diese geraten mit der Erfahrung des Phänomens auf dem Schirm in Konflikt.

Wir beobachten eine Wirkung auf dem Schirm. Die Ursache der Wirkung ist der Glühdraht und die Lochblende. Dieser Kausalzusammenhang ist objektiv und lässt sich exakt berechnen. Mit Wirkungsquanten, die vom Glühdraht zum Schirm wandern, sind mathematisch logische Beziehungen gemeint. Das Elektron selber ist weder Teilchen noch Welle. Es ist kein Objekt unserer sinnlichen Welterfahrung.

Weil einzelne Bewusstseinsinhalte in allen räumlichen, zeitlichen und kausalen Beziehungen dieselben sind, lassen sich diese mathematisch fassen. Die mathematischen Beziehungen verwechseln wir mit Wirklichkeit und machen es uns so unmöglich, Relativität von Raum und Zeit oder Quantenmechanik zu begreifen (Kapitel 5).

Das ist das Erstaunliche. Während die klassische Physik einherging mit einem grundlegenden Bewusstseinswandel der Menschheit, blieb dieser bei der modernen Physik bis heute aus. Unser Denken und Handeln ist noch immer in der überkommenen Vorstellung von Raum, Zeit und Materie gefangen. Ein tieferes Verständnis unserer körperlichen Welterfahrung steht noch aus.