

Heft 2

DIE BESONDERE DENKWEISE DES PHYSIKERS (*)

Jede Wissenschaft beeinflusst und prägt die Denkweise eines jeden, der sich mit ihr über längere Zeit auseinandersetzt. Daher unterscheidet man im allgemeinen den Juristen problemlos von dem Mathematiker, auch wenn man sich mit ihm gerade über Politik oder über Gartenpflege unterhält. Jede Wissenschaft hat ihre besondere Vorgehensweise bei der Analyse einer Situation, bei der Abstraktion und Vereinfachung. Und weil das so ist, sind die interdisziplinären Kontakte bei der Zusammenarbeit von Wissenschaftlern oft so mühselig.

Auch die Physik hat ihre ganz besondere Denkweise, die in manchen Details mit der der Ingenieurwissenschaften verwandt ist, in anderen Bereichen eher der Mathematik nahesteht. Ich bin sicher, dass eine fundierte Auseinandersetzung mit physikalischen Fragestellungen wesentlich erleichtert ist, wenn man diese besondere Denkweise in ihren Grundzügen verstanden hat. Deshalb ist dieses Heft nicht einfach nur eine Art zweiter Einleitung, sondern eine sehr konkrete Vorbereitung auf das danach Folgende.

Andererseits enthält dieses Heft keinerlei Fakten, die für das Verständnis der nachfolgenden Hefte unbedingt erforderlich sind. Falls der Leser also einige der hier behandelten Zusammenhänge bereits als zu komplex und aus dem Zusammenhang herausgerissen empfindet, kann er dieses Heft auch teilweise oder sogar komplett überschlagen und sich die Lektüre für einen späteren Zeitraum vornehmen.

2.1 Größen und Einheiten (*)

Die Physik beschreibt die reale Welt, indem sie den untersuchten Objekten (Systemen, s. Kapitel 2.6) physikalische Größen zuordnet (Energie, Impuls, elektrische Ladung, magnetisches Moment, Spin etc.), die dann jeweils bestimmte Werte annehmen. Alle diese Werteangaben sind immer das Produkt aus 2 Faktoren, einem Zahlenwert und einer (physikalischen) Einheitsangabe, z.B.

$$\text{Masse } M = 5 \cdot \text{Kilogramm} \quad (2.1)$$

Für die Festlegung dieser Einheit existiert in vielen Fällen (s.u.) ein reales physikalisches Objekt, im Falle der Masse das in Paris aufbewahrte Urkilogramm in Form eines Platinblocks, sowie eine Messvorschrift, die es ermöglicht, die in dem primären

(oder in einem anderen i.a. über mehrere Zwischenschritte hiergegen kalibrierten sekundären) Referenzobjekt enthaltene Menge an dieser Größe mit der im aktuellen Objekt enthaltenen Menge an derselben Größe zu vergleichen. Beim Massenvergleich ist die einfachste technische Realisierung einer derartigen Messvorschrift die klassische Balkenwaage, s. Abb. 1. Stellt man z.B. fest, dass die Waage genau austariert ist,



Abb. 1 Die Balkenwaage als typisches Beispiel eines vergleichenden Messinstrumentes (Quelle: www.trempel.de)

wenn das Messobjekt in der einen Waagschale liegt und 5 Referenzobjekte der Masse $1 \cdot kg$ in der anderen, dann wurde die Masse des Messobjektes zu $5 \cdot kg$ bestimmt.

Dieser unmittelbare Bezug auf ein reales Referenzobjekt ist nur für einige wenige physikalische Größen erforderlich. Alle weiteren Größen sind dann sogenannte *abgeleitete* Größen, ihre Einheit ist aus mehreren Grundeinheiten zusammengesetzt. Die genaue Form dieser Zusammensetzung ergibt sich aus den physikalischen Gesetzen, die diese Größen miteinander verknüpfen. Z.B. gilt für die mit der Bewegung einer Masse verbundene Energie

$$E_{kin.} = \frac{M \cdot v^2}{2}, \quad v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Δx : Wegelement; Einheit *Länge*

Δt : Zeitelement, Einheit *Zeit*

v : Geschwindigkeit, Einheit *Länge/Zeit*

Die Energie hat also die Einheit $Masse \cdot Länge^2 / Zeit^2$. Für diesen Begriff der Einheit einer physikalischen Größe ist oft auch die Bezeichnung *Dimension* gebräuchlich; ich werde sie ebenfalls überwiegend benutzen. Zur Spezifizierung der Struktur einer Dimension werde ich die Klammern $[]$ verwenden, also z.B.

$$[Energie] = Masse \cdot \frac{Länge^2}{Zeit^2} \quad (2.3)$$

Das interessante und auch faszinierende an der Struktur des physikalischen Gebäudes ist nun, dass die Energie unabhängig von ihrer Form (s. Abschnitt 3.3.2) immer diese Einheit hat. Auch wenn sie zunächst in anderen Einheiten geschrieben wird, z.B. bei der elektrischen Energie eines Kondensators (s. Abschnitt 4.3.1) als

$$E_{\text{elektr.}} = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (2.4)$$

C : elektrische Kapazität, Einheit *Ampère · s/Volt*
 U : elektrische Spannung, Einheit *Volt*

so dass sich jetzt die Einheit

$$\begin{aligned} [Energie] &= \text{elektrische Kapazität} \cdot (\text{elektrische Spannung})^2 \\ &= \text{Ampère} \cdot \text{Volt} \cdot \text{s} = \text{Watt} \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ergibt, so existiert immer eine Beziehung, mit der sich diese unterschiedlichen Einheiten **eindeutig** in einander umrechnen lassen. Diese Beziehungen fallen nicht vom Himmel, sondern sind wiederum die Folge physikalischer Gesetze, in diesem Fall des Gesetzes, das mechanische mit elektrischen Größen verbindet. Dies ist das nach *Charles August de Coulomb* (* 1736 in Angoulême; † 1806 in Paris) benannte Gesetz über die zwischen elektrischen Ladungen wirkende Kraft, s. Heft 4.

Die einzige Klasse von Größen, die keine physikalische Einheit besitzen, wird durch Verhältnisse zweier Größen derselben Dimension gebildet. Z.B. ist es in der Strömungsmechanik üblich, einen Strömungszustand durch eine Anzahl dimensionsloser Kennzahlen zu beschreiben. Die Relevanz der Reibungseffekte für die sich ausbildenden Strömungsverhältnisse erkennt man z.B. recht verlässlich aus der sog. *Reynold'schen Kennzahl*, benannt nach *Osborn Reynold* (* 1842 in Belfast; † 1912 in Watchet/England)

$$Re = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}} = \frac{v \cdot l}{\mu} \quad (2.6)$$

v : charakter. Geschwindigkeit des Strömungsprofils, Einheit *Länge/Zeit*
 l : charakter. Abmessung des durch- oder umströmten Objektes, Einheit *Länge*
 μ : kinematische Zähigkeit des Strömungsmediums, Einheit *Länge²/Zeit*

Im physikalischen Sinne ist auch der Winkel eine dimensionslose Größe, definiert als das Verhältnis der Bogenlänge zum Radius des an diesen Winkel angelegten Kreises, s. Abb. 2. Auch der Raumwinkel, definiert als das Verhältnis der Fläche des Oberflächensegments zum Quadrat des Radius des an diesen Raumwinkel angelegten Kreises, s. Abb. 3, ist dimensionslos. In physikalischen Gesetzen kann es also niemals vorkommen, dass als Argument von Winkelfunktionen dimensionsbehaftete Größen auftreten. Dieselbe Aussage gilt für die Argumente von logarithmischen oder exponentiellen Funktionen. Zum praktischen Umgang mit Winkel- und Raumwinkelgrößen s. jedoch Abschnitt 2.7.1.

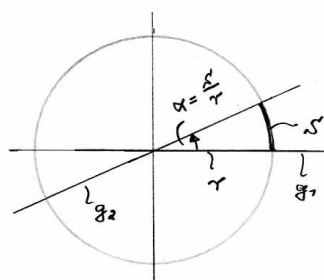


Abb. 2 Definition des Winkels als Verhältnis der Bogenlänge zum Radius

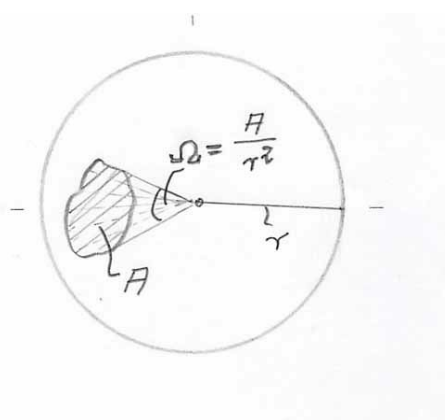


Abb. 3 Definition des Raumwinkels als Verhältnis der Fläche des Oberflächensegmentes zum Quadrat des Radius der angelegten Kugel

Es gibt aber auch Größen, die oft ohne Einheit benutzt werden, obwohl sie keinesfalls aus der Verhältnissbildung zweier mit derselben Dimension behafteter Größen entstanden sind. Ein wichtiges Beispiel hierfür ist die *Teilchenzahl*, ein wichtiger Begriff in der Quantenmechanik (Heft 7) und der chemischen Thermodynamik (Abschnitt 8.1.2). Die naheliegendste Wahl einer Einheit für die Teilchenzahl ist $1 \cdot \text{Teilchen}$ oder eben ein Vielfaches davon, z.B. $6,0221353 \cdot 10^{23} \cdot \text{Teilchen} = 1 \cdot \text{Mol}$. Dieser Wert $6,0221353 \cdot 10^{23}$ wird üblicherweise als die *Avogadro-Konstante* N_A bezeichnet, benannt nach *Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro, Graf von Quaregna und Ceretto* (* 1776 in Turin; † 1856 ebenda). Avogadro erarbeitete und publizierte die grundlegenden Fakten zur Klärung der Begriffe *Atom* und *Molekül*, fand aber erst post hum die ihm hierfür gebührende Anerkennung, nämlich auf dem Chemikerkongress des Jahres 1860 in Karlsruhe. Diese historisch bedingte Wahl einer Einheit für die Teilchenzahl wurde ursprünglich derart getroffen, dass $1 \cdot \text{Mol}$ Wasserstoffatome die Masse $1 \cdot g$ ergeben sollte. Durch die spätere Erkenntnis, dass alle Elemente, auch Wasserstoff, aus einem Gemisch von chemisch identischen *Isotopen*

unterschiedlicher Masse bestehen, war diese Festlegung noch nicht eindeutig. Um den bis dahin genutzten Zahlenwert möglichst wenig ändern zu müssen, legte man nun fest, dass 1 · Mol Kohlenstoffatome des Isotops aus 6 Protonen und 6 Neutronen (übliche Bezeichnung C_6^{12}) gerade die Masse $12 \cdot g$ habe,

$$N_A \cdot M(C_6^{12}) = 12 \cdot g \quad (2.7)$$

Man hat also die Einheit für die Teilchenzahl durch Festlegung einer Messvorschrift auf die Einheit für die Masse *zurückgeführt*.

Unglücklicherweise hat es sich nun eingebürgert, die Einheit *Teilchenzahl* nur selten explizit zu verwenden, z.B. die üblicherweise (und streng genommen fälschlicherweise) als *Molekulargewicht* bezeichnete Kenngröße eines Stoffes, also die Masse von N_A Molekülen dieses Stoffes, in g und nicht in g/Mol anzugeben. Resultat dieser inkonsequenten Vorgehensweise ist dann, dass bei konkreten Berechnungen immer wieder mit *hand waving arguments* erklärt werden muss, weshalb die Berechnungsformel noch mit N_A multipliziert oder dividiert werden muss. Die unter Chemikern übliche Bezeichnung *Stoffmenge* für die Teilchenzahl ist meiner Erfahrung nach auch nicht besonders glücklich gewählt, da sie die Verwechslung mit der Masse geradezu vorprogrammiert. Ich verspreche dem Leser, von Anfang an die Teilchenzahl als Einheit gleichberechtigt neben den anderen zu verwenden und ich hoffe, dass ich ihn so vor einigen Fallstricken im Verständnis physikalischer Zusammenhänge bewahren kann.

Ich habe die Diskussion des Konzeptes von physikalischen Größen und deren Einheiten bisher stillschweigend (aber bewusst) auf sog. *extensive* Größen begrenzt. Dies sind Größen mit *Mengeneigenschaft*, so dass beim Zusammenfügen eines Objektes aus 2 Einzelobjekten sich die Werte dieser physikalischen Größe **addieren**. Bei extensiven Größen ist die Verfügbarkeit einer Meßvorschrift zur Bestimmung des Zahlenfaktors i.a. unmittelbar einsichtig.

Etwas komplizierter ist dies bei den intensiven Größen wie der Temperatur oder der elektrischen Spannung. Bei der Zusammensetzung 2-er Objekte der gleichen Temperatur T geht der Wert von T keinesfalls auf das Doppelte, sondern bleibt konstant! Jetzt ist die Verfügbarkeit einer Meßvorschrift, mit deren Hilfe festgestellt werden kann, wann die Temperatur z.B. genau auf den doppelten Wert angestiegen ist, keinesfalls naheliegend. Diese Frage wird uns im Abschnitt 3.3.1 noch näher beschäftigen.

Die Festlegung der Anzahl von Grundeinheiten und deren Auswahl ist bis zu einem gewissen Grade willkürlich. Lange Zeit hat man versucht, mit ausschließlich mechanischen Grundeinheiten auszukommen. Dies entsprach der naturphilosophischen Grundhaltung des 19. Jahrhunderts, durch die man versuchte, alle Vorgänge letztlich als mechanische Abläufe aufzufassen. Das sog. *cgs-System* (centimètre, gram, seconde) führte aber zu sehr unhandlichen zusammengesetzten Einheiten für

die nicht mechanischen Größen, z.B. zu dem Ausdruck

$$\frac{\text{Masse}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Länge}^{\frac{3}{2}}}{\text{Zeit}} \quad (2.8)$$

für den elektrischen Strom. Das heute international akzeptierte und eingeführte sog. *SI-System* (*Système International d'Unités*) verwendet die 7 Grundeinheiten

- **Länge** mit der Basiseinheit Meter (m), festgelegt als die Strecke, die das Licht im Vakuum in einer bestimmten Zeit zurücklegt;
- **Zeit** mit der Basiseinheit Sekunde (s), festgelegt über die Schwingungszeit der Mikrowellenstrahlung, die das Cäsiumisotop C^{133} beim Übergang zwischen 2 bestimmten Zuständen des Atomkerns abstrahlt;
- **Masse** mit der Basiseinheit Kilogramm (kg), festgelegt als die Masse des beim **Bureau International des Poids et Mesures** (BIPM) in Paris aufbewahrten Urkilogramms, einem nicht-magnetischen Metallblock aus einer Platin-Iridiumlegierung;
- **Temperatur** mit der Basiseinheit Kelvin (K), benannt nach *Sir* (*seit 1866*) *William Thomson* (* 1824 in Belfast /NordIrland; † 1907 in Nethergall b. Largs), seit 1892 *Lord Kelvin of Largs*, ursprünglich über den Gefrierpunkt von Wasser unter Normaldruck festgelegt, heute festgelegt über den sog. Tripelpunkt des Wassers (Koexistenz der Phasen fest, flüssig, gasförmig, s. Abschnitt 8.1.14), dem die Temperatur $273,16 \cdot K (= 0,01 \cdot ^\circ C)$ zugewiesen wurde;
- **elektrische Stromstärke** mit der Basiseinheit *Ampère*, benannt nach *André Marie Ampère* (* 1775 in Lyon; † 1836 in Marseille), festgelegt als der Strom, der in einem unendlich langen Paar von elektrischen Leitungen fließt, die parallel zueinander in einem Abstand von $1 \cdot m$ ausgerichtet sind, und dadurch pro $1 \cdot m$ Leitungslänge eine Kraft von genau $2 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Newton} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot kg \cdot m \cdot s^{-2}$ bewirkt, benannt nach *Sir Isaac Newton* (* 1643 in Woolsthorpe b. Grantham/England; † 1727 in Kensington/London);
- **Teilchenzahl** mit der Basiseinheit *Mol*, festgelegt über die Bedingung, dass die Masse von $1 \cdot \text{Mol}$ Atomen des Kohlenstoffisotops C_6^{12} genau $12 \cdot g$ beträgt;
- **Lichtstärke** mit der Basiseinheit *Candela* (cd), festgelegt über die Bedingung, dass die Lichtstärke einer monochromatischen Strahlungsquelle von $555 \cdot nm$ und einer Strahlungsstärke von $1 \cdot \text{Watt/sterad}$ genau $683 \cdot cd$ beträgt.

Man sieht an diesen aktuell gültigen internationalen Festlegungen, dass man von der ursprünglichen Konzeption, jeder Grundeinheit ein real existierendes **technisches** Objekt als Repräsentant der Basiseinheit zuzuordnen, weitgehend abgekommen ist und zwar aus Gründen der erreichbaren Konstanz und Vergleichbarkeit.

Stattdessen definiert man diese Grundeinheiten indirekt, indem man gewissen Naturkonstanten einen bestimmten Wert zuordnet. Auf diese Weise wurde z.B. das *Urmeter*, ein früher real existierendes ebenfalls in Paris aufbewahrtes Objekt aus Platin, dadurch abgelöst, dass man der Vakuumlichtgeschwindigkeit einen bestimmten Wert zuordnete. Dies geschah vernünftigerweise derart, dass die vorher über das Urmeter definierte Längeneinheit $1 \cdot m$ hierbei möglichst unverändert blieb.

Lediglich für die Masse konnte bisher keine Naturkonstante (bzw. eine geeignete Kombination von Naturkonstanten) gefunden werden, die ausreichend exakt definiert und messbar ist, um das Urkilogramm aus Platin-Iridium ablösen zu können. Dies wird sich voraussichtlich in naher Zukunft ändern. Nach dem neuesten Vorschlag der *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) ([4]) wird man in Zukunft das Kilogramm definieren, indem man den Zahlenwert der Plancksche Konstante festlegt. Nachdem vorher die Längen- und die Zeiteinheit festgelegt worden sind, ist damit auch das Kilogramm wohl bestimmt.

Bei konkreten Berechnungen treten die physikalischen Größen häufig in Mengen auf, die sich von der jeweiligen Grundeinheit um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Der Einfachheit halber versieht man dann die Einheitsangabe mit einer entsprechenden Vorsilbe und zwar entsprechend folgender Vereinbarung (erläutert an Hand des Beispiels der Einheit *Watt* für den Energiestrom):

$$\begin{array}{ll}
 1 \cdot \text{Milliwatt} = 1 \cdot mW = 1 \cdot 10^{-3} \cdot W & 1 \cdot \text{Kilowatt} = 1 \cdot kW = 1 \cdot 10^3 \cdot W \\
 1 \cdot \text{Mikrowatt} = 1 \cdot \mu W = 1 \cdot 10^{-6} \cdot W & 1 \cdot \text{Megawatt} = 1 \cdot MW = 1 \cdot 10^6 \cdot W \\
 1 \cdot \text{Nanowatt} = 1 \cdot nW = 1 \cdot 10^{-9} \cdot W & 1 \cdot \text{Gigawatt} = 1 \cdot GW = 1 \cdot 10^9 \cdot W \\
 1 \cdot \text{Pikowatt} = 1 \cdot pW = 1 \cdot 10^{-12} \cdot W & 1 \cdot \text{Terawatt} = 1 \cdot TW = 1 \cdot 10^{12} \cdot W \\
 1 \cdot \text{Femtowatt} = 1 \cdot fW = 1 \cdot 10^{-15} \cdot W & 1 \cdot \text{Petawatt} = 1 \cdot 10^{15} \cdot W \\
 1 \cdot \text{Attowatt} = 1 \cdot 10^{-18} \cdot W & 1 \cdot \text{Exawatt} = 1 \cdot 10^{18} \cdot W
 \end{array}$$

Ein Hinweis noch scheint mir zum Abschluss dieses Kapitels angebracht: Insbesondere unter den Elementarteilchenphysikern hat es sich eingebürgert, Gleichungen durch diverse Naturkonstanten zu dividieren und so zu *vereinfachen*. Geschwindigkeiten sind dann auf die Lichtgeschwindigkeit bezogen*, Größen von der Einheit einer Wirkung (= *Energie* · *Zeit*) auf das Planck'sche Wirkungsquantum \hbar usw. . Dadurch werden alle diese Größen dimensionslos. Das erspart dem Theoretiker Schreibarbeit, trägt aber nach meiner Überzeugung nicht zur Klarheit in der Darstellung bei. Und spätestens, wenn es gilt, wirklich etwas konkret zu berechnen, wird es fürchterlich! Man sollte sich eben nicht ohne Not der Vorteile berauben, die der konsequente Umgang mit physikalischen Größeneinheiten bietet, s. hierzu auch Abschnitt 2.7.1.

*Diese Vorgehensweise wird oft, etwas schlampig formuliert, in der Weise erklärt, daß "die Lichtgeschwindigkeit gleich 1 gesetzt" wurde usw. .

2.2 Gesetze und Modelle (*)

Der Physiker sucht nach *möglichst einfachen* Gesetzen und Zusammenhängen, mit deren Hilfe er die von ihm beobachtbaren Abläufe in der realen Welt beschreiben und vorhersagen (s. Kapitel 2.3) kann. Die Betonung liegt dabei auf dem Wort *einfach*. Im Zweifelsfall wird der Physiker immer geneigt sein, der Theorie mit der einfacheren Struktur den Vorzug zu geben, wenn sie denn nicht gegenüber der komplizierteren offensichtliche Mängel in der Verlässlichkeit oder dem Umfang ihrer Aussagekraft aufweist. Und in der Tat stellt eine allzu kompliziert strukturierte Theorie oft nur einen Zwischenzustand in der Erkenntnislage dar, der mit dem Fortschreiten der Forschung irgendwann überwunden wird und in eine wieder *schöne* und vergleichsweise einfache, aber umfassendere Theorie mündet. Ein gutes Beispiel hierfür ist der *Elementarteilchenzoo* der 50-er Jahre von schließlich etwa 200 Elementarteilchen, den es dann mit der Quark-Theorie gelang, auf nur 3*4 Spezies[†] zu lichten. Die Faszination und Schönheit einer neuen Theorie zeigt sich oft auch darin, dass sie Widersprüche in der alten Theorie aufhebt, derer man sich oft im Grunde schon lange bewusst war, sie aber nicht so richtig wahr haben wollte und mit etwas vagen Argumenten *unter den Teppich gekehrt* hat. Ich nenne als Beispiel für eine derartige Situation das Konzept der klassischen Thermodynamik, die sich noch nicht auf die Quantenmechanik abstützen konnte. Zur Berechnung der Entropie musste die Anzahl der elementaren Zustände abgezählt werden, eine nicht lösbare Aufgabe, solange man einem in ein Volumen eingefangenen Teilchen zubilligte, dass es jede beliebige Geschwindigkeit annehmen kann. Erst die Quantenmechanik beschränkte die Anzahl dieser Zustände auf eine Menge von maximal abzählbar unendlich vielen Elementen. Ein weiteres vielleicht noch stärker beeindruckendes, weil noch leichter nachvollziehbares Beispiel ist das im Abschnitt 10.3.4 diskutierte Problem der Helligkeit oder vielmehr der Dunkelheit des Nachthimmels.

Auch die Kritik an dem geo-zentrischen Weltbild der Astronomen vor *Nikolaus Kopernikus* (eigtl. Kopernik) (Priester, Arzt und Astronom; * 1473 in Thorn (heute Toruń/Polen); † 1543 in Frauenburg (heute Frombork/Polen)) und *Johannes Kepler* (*1571 in Weil b. Böblingen; † 1630 in Regensburg) entzündete sich aus heutiger Sicht primär nicht an der Annahme, dass dieses Bild vielleicht falsch wäre in dem Sinne, dass es falsche Vorhersagen macht. Aber die Berechnungsformeln z.B. für die in diesem Modell zyklodischen Planetenbahnen waren eben so unästhetisch kompliziert. Da sind die Keplerschen Ellipsen doch viel ansprechender! Das Verhältnis der Physiker zu den von ihnen geschaffenen Modellen wird aus meiner Sicht sehr gut durch ein Zitat beschrieben, das der französische Physiker und Nobelpreisträger *Pierre-Gilles de Gennes* (* 1932 in Paris; z.Zt. Paris) in einem Interview als von dem

[†]Das derzeit weitgehend akzeptierte und nahezu alle bisher bekannten experimentellen Daten gut beschreibende sog. *Standardmodell* der Elementarteilchentheorie postuliert 3 Familien aus jeweils 2 Quarks und 2 Leptonen als ruhemassebehaftete Bausteine der Materie, dazu eine Reihe von Teilchen teilweise ohne und teilweise mit Ruhemasse, die für die verschiedenen Wechselwirkungen verantwortlich sind.

amerikanischen Physiker (und ebenfalls Nobelpreisträger) *Richard Feynman* (* 1918 in New York; † 1988 in Los Angeles) stammend nannte:

Theory is the best guess.

Welches Modell also zur Beschreibung eines Ablaufs benutzt wird, ist zum großen Teil eine Frage der Praktikabilität, manchmal auch des Geschmacks. Dies gilt natürlich nur, solange diese Modelle äquivalent, also ineinander umrechenbar sind und insbesondere von denselben Annahmen und Voraussetzungen ausgehen. Damit eine neue Theorie eine Chance hat, eine bereits bestehende abzulösen, muss sie insbesondere 3 Bedingungen erfüllen:

1. Sie soll mit möglichst allen denjenigen bisher bekannten experimentellen Fakten verträglich sein, die auch der bisherigen Theorie entsprechen.
2. Sie muss zusätzlich mit einigen experimentellen Fakten verträglich sein, die der bisherigen Theorie widersprechen.
3. Sie soll nicht unnötig kompliziert sein.

Wenn zur Erfüllung dieser Bedingungen eine Theorie geeignet ist, die mit einigen bisher als selbstverständlich angenommenen Vorstellungen bricht, z.B. die Anzahl der Raumkoordinaten auf $N > 3$ erhöht, dann wird der Physiker ihr dennoch den Vorzug geben. Die Frage der mangelnden Anschaulichkeit spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle, man vertraut auf den Effekt der Gewöhnung.

An dieser Stelle ist es angebracht, den Begriff des (physikalischen) Modells noch etwas genauer zu umschreiben: Ziel des Physikers ist es nicht, die reale Welt in all ihren Facetten und Nuancen vollständig zu beschreiben. Sein Ziel ist es vielmehr, von einem realen Objekt und seinem Verhalten das ihm eigene *typische* Verhalten zu extrahieren und von Störeffekten zu trennen, die dieses Bild verzerren. Ergebnis dieser Abstraktion und Vereinfachung ist ein physikalisches Modellsystem, ein Objekt, das es in dieser Reinheit in der realen Welt gar nicht gibt. Dennoch aber liefert erst das Studium solcher idealisierter Objekte das tiefere Verständnis für die Zusammenhänge in der realen Welt. Typische Beispiele solcher Idealsysteme sind das ideale (klassische) Gas, der ideale Festkörperkristall, die ideale Newtonsche Flüssigkeit etc. .

Der Physiker ist also der große Vereinfacher unter den Naturwissenschaftlern. Seine besondere Aufgabe dabei ist es, die (möglichst wenigen) *relevanten* Eigenschaften eines Objektes herauszuarbeiten. Dabei macht er immer wieder die Erfahrung, dass bei zusammengesetzten Systemen diese relevanten Eigenschaften gerade solche sind, die am Einzelobjekt nur schwer oder gar nicht erkannt werden können. Ob z.B. ein System von 10^{24} identischen Molekülen eher als kubisch-flächenzentriertes oder als kubisch-raumzentriertes 3D-Gitter kristallisieren wird, ist natürlich im Grundsatz durch die elektronische Struktur des einzelnen Moleküls festgelegt. Diese Neigung ist aber aus dieser Struktur nur äußerst schwer zu extrahieren, da sie für das Verhalten

des Einzelmoleküls z.B. bei der Ausbildung von Absorptions- und Ionisationsspektren nur eine untergeordnete Rolle spielt. Vielteilchen-Systeme sind offenbar rückgekoppelte Systeme im Sinne des Kapitels 2.6.2 mit neuen nur dem Gesamtsystem, aber nicht oder nur schwer den Einzelbausteinen zuordbaren Eigenschaften.

Durch diese Art der Modellierung entsteht häufig so etwas wie eine Schalenstruktur von physikalischen Modellen der realen Welt, skaliert nach einer als für die aktuelle Betrachtungsweise wichtig angesehenen physikalischen Größe. Das kann z.B. die Energie sein, die die jeweiligen Systeme mit anderen austauschen können. Im einfachsten Fall ist dies einfach die typische geometrische Abmessung der betrachteten Objekte. Dann entsteht so etwas wie ein mit unterschiedlicher geometrischer Auflösung betrachtetes Bild unserer Welt:

Die *Elementarteilchenphysik* beschreibt die Gesetze, nach denen sich die derzeit als elementar angesehenen Quarks zu den Bausteinen der Atome (Protonen, Neutronen, Elektronen) und zu anderen in den Atomen nicht unmittelbar auffindbaren Teilchen (schwere Baryonen und Mesonen) zusammensetzen. Der typische Durchmesser eines Quarks beträgt ca. $10^{-17} \cdot m$, die bei der Bildung eines Hadrons (Baryon oder Meson) aus Quarks freiwerdende Energie liegt in der Größenordnung $10^8 \cdot eV$ (zur Energieeinheit *Elektronenvolt* s. Kapitel 8.3).

Die *Kernphysik* befasst sich mit den Regeln des Aufbaus der Atomkerne aus den Bausteinen Proton und Neutron sowie der Umwandlung von Atomkernen untereinander. Atomkerne haben einen typischen Durchmesser von $10^{-15} \cdot m$ (Wasserstoff) bis $10^{-14} \cdot m$ (Uran); die bei der Bildung eines Atomkerns aus Protonen und Neutronen (und weiteren Teilchen) freiwerdende Energie pro Nukleon beträgt ca. $10^7 \cdot eV$.

Die *Atom- und Molekülphysik* befasst sich mit der Struktur der Elektronenhüllen, die sich um jeden Atomkern herum zu dessen elektrischer Neutralisierung bilden, sowie mit deren Veränderung bei der Anlagerung mehrerer Atome zu *Molekülen*. Die Wissenschaft dieser außerordentlich komplex strukturierten Bindungsmechanismen wird üblicherweise als *Chemie* bezeichnet. Moleküle haben eine typische Ausdehnung von $10^{-9} \cdot m$; die bei der Bildung eines Moleküls aus seinen Atombestandteilen umgesetzte Energie kann beiderlei Vorzeichen haben und liegt in der Größenordnung von $10^0 \cdot eV$.

Die Wissenschaft von der Agglomeration einer makroskopischen Anzahl von Molekülen zu den verschiedenen Aggregatzuständen fest/flüssig/gasförmig und die Analyse der Systemeigenschaften dieser Aggregatzustände und ihrer Umwandlungen untereinander zerfällt in eine Vielzahl von Teilbereichen mit sehr unterschiedlichen Bezeichnungen und Schwerpunkten:

Festkörperphysik, Materialwissenschaft, Physikalische Chemie, Rheologie, Thermodynamik usw. .

Die Objekte, mit denen sich diese Wissenschaften befassen, haben meistens Abmessungen im Bereich $10^{-4} \cdot m$ bis $10^1 \cdot m$. Die Prozesse, die hierbei studiert werden, sind mit Energieänderungen der Größenordnung $10^{-6} \cdot eV$ (thermische Energie $\kappa \cdot T$ bei $1 \cdot mK$) bis $10^{25} \cdot eV$ (Schmelzwärme von $1 \cdot kg$ Beryllium) verbunden.

In konsequenter Fortführung dieser Strukturierung wäre als nächstes die *Astrophysik* zu nennen, die sich mit der Entstehung und Fortentwicklung ganzer Himmelskörper befasst, also von Planeten, Kometen, Sternen etc. sowie von Agglomeraten solcher Körper zu Sonne/Planetensystemen, Sternhaufen und Galaxien. Die dabei auftretenden geometrischen Abmessungen reichen von $10^9 \cdot m$ (Durchmesser unserer Sonne) bis ca. $10^{21} \cdot m$ (Durchmesser unserer Galaxie). Die relevanten Energieumsetzungen reichen von $10^{47} \cdot eV \approx 10^{22} \cdot kWh$ (gravitationsbedingte Bindungsenergie des Systems Erde-Mond) bis ca. $10^{72} \cdot eV \approx 10^{47} \cdot kWh$ (Energieinhalt des im Zentrum unserer Milchstraße vorhandenen *schwarzen Lochs*).

Den Abschluss bildet dann die *Kosmologie*, also die Wissenschaft von der Entstehung und raum-/zeitlichen Entwicklung unserer Welt als ganzem. Die nun relevanten Abmessungen sind von der Größenordnung $10^{26} \cdot m$, die gesamte im Kosmos enthaltene Energie schätzt man auf ca. $10^{89} \cdot eV \approx 10^{63} \cdot kWh$.

Zu dieser an den geometrischen Abmessungen orientierten Sicht unserer Welt gibt es eine sehr ansprechende populärwissenschaftliche Darstellung sowohl als Buch wie als Video ([9]).

Der heutige Kenntnisstand der Wissenschaft ist dadurch gekennzeichnet, dass er in den Zentren der jeweiligen Einzeldisziplinen i.a. relativ weit fortgeschritten ist und die weißen Flecken der Erkenntnis mehr an den Grenzbereichen dieser Disziplinen zu finden sind, also z.B. bei den Fragen, wie aus den Eigenschaften des Einzelmoleküls oder -atoms auf die Festkörpereigenschaften eines Molekül- oder Atomkristalls geschlossen werden kann. Diese unter dem Schlagwort *Relevanz interdisziplinärer Forschung* allseits beschworene Situation wird wohl noch über lange Zeit ein Faktum bleiben.

Eine unmittelbare Folge dieses Denkens in unterschiedlich stark verfeinerten Modellen ist das besonders stark ausgeprägte Denken in Größenordnungen. Um nämlich beurteilen zu können, welche physikalischen Effekte in einem konkreten Fall relevant sind und welche (in diesem speziellen Fall) vernachlässigt werden können, muss man die Größenordnung der Werte kennen, die die physikalischen Größen annehmen. Treten z.B. Kräfte unterschiedlichen Ursprungs auf, wobei die Kräfte vom Typ A alle im Bereich $1 \cdot N$ liegen, die Kräfte vom Typ B dagegen alle im Bereich von $10^{-3} \cdot N$ und weniger, so wird man ohne Bedenken die Kräfte vom Typ B für die Analyse des Systems (zunächst) außer Acht lassen. Es entspricht der allgemeinen Erfahrung des Experimentalphysikers, dass es nur äußerst selten darauf ankommt, eine physikalische Größe genauer als auf etwa 1 ‰ bis 1% zu kennen. Oft ist es sogar schwierig, sie überhaupt mit einer noch höheren Genauigkeit zu messen. Aus dieser Sicht also ist das Vernachlässigen von Effekten ausreichender niedriger Größenordnung nicht etwa eine tragbare Nachlässigkeit, sondern eher eine logische Notwendigkeit[‡]. Um sich also

[‡]Hier wird ein fundamentaler Gegensatz zur Denkweise des Kaufmanns, genauer des Buchhalters, deutlich. Dieser schreibt nicht nur ohne Bedenken einen Posten in Milliardenhöhe (also ca. 10^9 Euro) einschließlich der Centwerte in die Bilanz, also mit einer Auflösung von 10^{-11} , sondern er glaubt auch noch fest an die Relevanz all dieser Ziffern.

in der physikalischen Welt zurechtzufinden, sollte der Physiker eine ausreichende Anzahl von typischen Zahlenwerten physikalischer Kenngrößen griffbereit, am besten im Kopf haben, also typische Abmessungen wichtiger Objekte, Zeitkonstanten wichtiger physikalischer Prozesse und die damit verbundenen Energieänderungen usw. . U.a; deshalb habe ich am Ende eines jeden Heftes eine kleine Auswahl derartiger für den Inhalt dieses Heftes wichtiger Zahlenwerte zusammengestellt.

Insgesamt betrachtet bleibt unbestritten, dass der Physiker danach strebt, die in der realen Welt auftretenden Phänomene erklären zu können, d.h. auf eine Frage vom Typ

Warum tritt unter gewissen Bedingungen der XYZ-Effekt auf?

eine aus seinen Modellen und Gesetzen ableitbare Antwort geben zu können. Hierin ist er jedoch in 2 unterschiedlichen Richtungen und aus gänzlich unterschiedlichen Gründen eingeschränkt:

1. Bei komplexen Fragestellungen insbesondere aus der makroskopischen Welt ist eine umfassende und konkrete Antwort eben wegen der Komplexität des Problems nicht möglich. Ein uns allen bekanntes Beispiel ist die Frage nach einer Standort-bezogenen längerfristigen Wetterprognose. Die Einschränkung ist meist nicht von grundsätzlicher Natur, sie liegt also nicht in der physikalischen Theorie selbst begründet, sondern resultiert lediglich aus den begrenzten Möglichkeiten des diese Frage bearbeitenden Physikers bzw. aus dem begrenzten Umfang der ihm hierfür zur Verfügung stehenden Informationen.
2. Bei sehr grundlegenden Fragestellungen ist die Antwort eventuell bereits ganz oder partiell identisch mit einem der Axiome der aktuellen Theorie. Der Nicht-Physiker sieht i.a. dennoch keinen Grund, weshalb es verboten sein sollte, diese Fragen zu stellen. Der Physiker dagegen sieht im Rahmen der aktuellen Theorie keine Möglichkeit, hierauf zu antworten. Ein typisches Beispiel einer derartigen Frage ist die nach der tieferen Ursache für die Existenz der Gravitation:

Warum wirkt zwischen 2 Körpern mit endlicher Masse eine gravitative Wechselwirkung?

Diese Frage ist aus der Sicht des Physikers nicht beantwortbar. Auch der Hinweis auf den Austausch virtueller Gravitonen (Kap. 7.14) bzw. auf die lokale Krümmung des geometrischen Raumes (Abschnitt 3.2.16) wäre keine Antwort auf diese Frage, sondern lediglich eine andersartige Beschreibung der Tatsache, **dass** diese Wechselwirkung existiert, nicht aber eine Antwort auf die Frage, **warum** dies so ist. Diese Argumentation wird den Nicht-Physiker gelegentlich verwirren, sie ist aber eine unvermeidliche Konsequenz aus dem axiomatischen Aufbau jeder physikalischen Theorie.

Zum Abschluss dieses Kapitels möchte ich noch auf den *Vereinheitlichungswahn* des Physikers eingehen. Hierunter verstehe ich das Streben nach nicht nur möglichst einfach strukturierten Theorien, sondern insbesondere nach einer Theorie, die die

physikalischen Objekte mit möglichst wenig objektspezifischen Parametern charakterisiert, und die insbesondere mit möglichst wenig Naturkonstanten auskommt. Man gibt sich also nicht damit zufrieden, z.B. die Masse von Proton, Neutron und Elektron genau zu kennen, sondern man sucht nach einer Theorie, aus der diese Zahlenwerte **zwangsläufig** resultieren. Ebenso versucht man, für die verschiedenen bekannt gewordenen Wechselwirkungen,

- die gravitative Wechselwirkung zwischen Teilchen mit endlicher Masse,
- die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen elektrisch geladenen Teilchen,
- die sog. schwache Wechselwirkung zwischen allen Elementarteilchen, die eine sog. schwache Ladung tragen, und schließlich
- die starke Wechselwirkung zwischen den Hadronen bzw. primär zwischen den sie bildenden Quarks,

eine gemeinsame Theorie zu finden, die sich dann in den jeweiligen speziellen Situationen auf die oben genannten Wechselwirkungen reduziert. An dieser Stelle ist die Diskussion noch an vielen Stellen offen und ungeklärt. Man ist z.B. bis heute nicht in der Lage, die Ruhemasse der Elementarteilchen theoretisch zu begründen. Ein anderes seit langem bekanntes und viele Physiker beunruhigendes Beispiel ist die von *Arnold Sommerfeld* (* 1868 in Königsberg/(damals)Preußen; † 1951 in München) in die Theorie der Atomspektren eingeführte *Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante*

$$\frac{\mu_0 \cdot c_0 \cdot e^2}{2 \cdot h} = (137,0359895)^{-1} \quad (2.9)$$

Der Kehrwert dieser dimensionslosen, also vom gewählten Einheitensystem unabhängigen Naturkonstanten ist bis auf eine Korrektur der Größenordnung 10^{-4} gleich der Primzahl 137. Ist dies ein Zufall, oder verbirgt sich dahinter die Auswirkung einer noch fundamentaleren Theorie? Physiker glauben i.a. nicht an Zufälle.

2.3 Das Experiment: Zentrum wissenschaftlicher Arbeit (*)

Um den Unterschied zwischen Naturwissenschaft und Naturphilosophie klar zu machen und um dem an Naturwissenschaft Interessierten möglichst früh ein mächtiges Werkzeug an die Hand zu geben, mit dem er selbst und ohne fremde Hilfe ernsthafte wissenschaftliche Auseinandersetzung von Pseudowissenschaft und Scharlatanerie unterscheiden kann, sollte jedem, der zum Eintritt in das Gebäude der Naturwissenschaft aufgefordert wird, als erstes die zentrale Bedeutung des **wissenschaftlichen Experimentes** klargemacht werden. Das möchte ich in diesem Kapitel versuchen.

Der Physiker plant und betreibt den wissenschaftlichen Fortschritt immer nach demselben Schema:

1. Auf Basis der von ihm und/oder anderen Wissenschaftlern akzeptierten (oder auch angezweifelte) aktuellen Theorie plant er ein physikalisches Experiment mit einem quantifizierbaren Messergebnis. Dieses Meßergebnis ist entweder mit Hilfe der Theorie vorhersagbar oder es liefert - eventuell mit weiteren noch zu erstellenden Messergebnissen - die Chance, einige bisher noch weiße Flecken der aktuellen Theorie zu füllen.
2. Er führt dieses Experiment durch und wertet es aus und dokumentiert dabei alle für das Meßergebnis relevanten oder auch nur eventuell relevanten Einzelheiten der Durchführung und Auswertung. Außerdem schätzt er die Verlässlichkeit (den *Fehler*) des Messergebnisses auf Basis der experimentellen Gegebenheiten ab (s. Abschnitt 2.7.4).
3. Er vergleicht das experimentelle Ergebnis mit der Vorhersage der Theorie. Wenn diese beiden Datensätze nicht miteinander verträglich sind, der Unterschied also größer ist als der für die Messung abgeschätzte Fehler, wird er i.a. das Experiment wiederholen, vorzugsweise unter leicht modifizierten Bedingungen. Bleibt die Diskrepanz erhalten, so wird er dies als starken Hinweis dafür ansehen, dass die Theorie zumindest in Teilen verfeinert oder korrigiert werden muss, ja dass eventuell sogar eine ihrer Kernaussagen als falsch angesehen werden muss.
4. Diese Phase des Wankens einer bisher als etabliert angesehenen Theorie ist oft die Zeit intensiver *exploratorischer Experimente*: Durchführung einer möglichst großen Anzahl von Einzelexperimenten mit systematischer Variation der Versuchsparameter, um auf diese Weise eine möglichst einfache Strukturierung der experimentellen Daten zu finden. Dieses vordergründig etwas einfalllos erscheinende Vorgehen ist schon häufig der Schlüssel gewesen zum Aufspüren der gesuchten theoretischen Zusammenhänge.

Das Experiment siegt also im Zweifelsfall **immer** über die (aktuelle) Theorie. Voraussetzung ist natürlich, dass es korrekt ausgeführt und ausgewertet worden ist. Um das sicher zu stellen, findet die Auseinandersetzung darüber öffentlich in Form von Publikationen statt und zunächst **immer** in wissenschaftlichen Zeitschriften. Erst **danach** geht der ernsthafte Wissenschaftler gegebenenfalls auch einmal an die allgemeine Presse.

Immer wenn gegen diese Vorgehensweise offensichtlich verstoßen wird - und dies kann meist auch der interessierte Laie erkennen - ist der Verdacht auf wissenschaftliche Scharlatanerie mehr als berechtigt! Zeitgenossen, die mit neuen wissenschaftlichen Theorien hausieren gehen, sollte man immer zuerst nach Experimenten und deren exakter Dokumentation und Publikation fragen, die zu diesen neuen Ansätzen führten, oder zumindest nach **von ihnen** vorgeschlagenen Experimenten, mit deren Hilfe die Überlegenheit ihrer neuen theoretischen Ansätze gegen-

über der akzeptierten Theorie überprüft werden kann. Ich erinnere in diesem Zusammenhang an den enormen Aufruhr, den die US-amerikanischen Forscher Martin Fleischmann und Stanley Pons 1989 erregten, als sie angeblich die sog. *kalte Kernfusion* entdeckt hatten: Bei gewissen elektrochemischen Experimenten traten Wärmetönungen auf, die sie sich nicht rein elektrochemisch erklären konnten. Daraus schlossen sie mutig, dass sie in ihrer Anordnung kernphysikalische Prozesse initiiert hatten! Fleischmann und Pons haben ihre Arbeit wohl zunächst in einer wissenschaftlichen Zeitschrift publiziert ([7]), gingen dann aber zeitgleich mit ihrer mehr als mutigen Schlussweise an die breite Öffentlichkeit, also ohne der wissenschaftlichen Gemeinschaft die Chance zu einer Überprüfung oder auch nur zu einer kritischen Wertung ihrer Ergebnisse zu geben. Wie zu erwarten war, hielt diese Wertung dann auch einer nüchternen Prüfung nicht stand, auch wenn die Diskussion darüber bis heute nicht völlig abgeklungen ist.

Die unbestrittene Tatsache, dass im strengen Sinne der mathematischen Logik eine wissenschaftliche Theorie bei dieser Vorgehensweise niemals bestätigt, also als richtig bewiesen, sondern höchstens durch Aufstöbern eines Gegenbeispiels als falsch erkannt werden kann[§], beschäftigt die Wissenschaftsphilosophen bis heute. Dies gipfelt in Zweifeln, ob überhaupt unsere wissenschaftlichen Theorien zu einem realen Bild der realen Welt führen, ja ob denn überhaupt die Realität abbildbar sei, oder ob wir nicht durch unsere von uns geprägten Theorien das Bild der Realität bereits so stark modifizieren, dass dieses Bild mehr unsere Eigenart der Theorienbildung wiedergibt als die Realität der realen Welt.

Ich persönlich sehe bis heute (wiederum für mich persönlich !) keinen Ansatzpunkt, wie derartige Argumentationsketten die wissenschaftliche Vorgehensweise in irgendeiner Weise beeinflussen könnten. Es handelt sich um eine Art Fundamentalkritik ohne Alternativ-Vorschläge. So interessant diese Fragestellung aus naturphilosophischer Sicht ohne Zweifel ist, solange die Auseinandersetzung mit ihr nicht in einem Alternativ-Vorschlag zur aktuellen naturwissenschaftlichen Methodik mündet, wird sie meiner Einschätzung nach letztlich ohne Wirkung bleiben.

Unbenommen davon ist natürlich unstrittig, dass ein und derselbe physikalische Sachverhalt mit sehr unterschiedlichen Ansätzen beschrieben werden kann, die dann aber ineinander umgerechnet werden können. Die Ansätze können aber so unterschiedlich sein, dass sich diese Umrechenbarkeit der anschaulichen Vorstellungskraft weitgehend entzieht. Ich werde hierauf im Heft 7 zurückkommen.

[§]Jede wissenschaftliche Theorie besteht in einer Reihe von Aussagen, die für alle Elemente einer Menge von physikalisch wohl definierten Situationen gilt. Da die Mächtigkeit dieser Menge i.a. zumindest abzählbar unendlich ist, wenn nicht gar überabzählbar, läßt sich diese Aussage allein über Experimente, deren Anzahl in endlicher Zeit trivialerweise endlich bleiben muß, nicht vollständig prüfen. Solange also ausschließlich reale Experimente für die Prüfung einer Theorie zugelassen werden, bleibt die Theorie unbeweisbar.

2.4 Bilanzen und Erhaltungssätze (*)

Eines der mächtigsten Werkzeuge in den Händen des Physikers ist die geschickte Ausnutzung der Erhaltungssätze, die für eine ganze Reihe der von ihm geschaffenen Größen gelten: Bei der Betrachtung von sogenannten abgeschlossenen Systemen (Abschnitt 3.3.1) ändert sich der in diesem System enthaltene Gesamtwert dieser Größen nicht. Physikalische Größen mit dieser Eigenschaft sind z.B. die Energie, der Linear-Impuls, der Drehimpuls, die Masse (mit Einschränkungen, s. Abschnitt 3.3.9), die elektrische Ladung, das magnetische Moment, aber auch eine ganze Reihe von Größen aus dem Bereich der Kern- und Elementarteilchenphysik wie die sog. Baryonenzahl, die Leptonenzahl usw. . Abgeschlossen im Sinne dieser Betrachtungen ist ein System genau dann, wenn es keine Prozesse zulässt, bei dem eine der betrachteten physikalischen Größen an Objekte außerhalb dieses Systems abgegeben oder von ihm aufgenommen werden kann. Ihren besonderen Nutzen entfalten diese Erhaltungssätze dadurch, dass sie den Umfang der Prozesse, die in einem System möglich sind, deutlich einschränken, nämlich auf eben diejenige, die diese Erhaltungssätze erfüllen. Und gar nicht einmal selten ist diese Einschränkung so stark, dass überhaupt nur noch einige wenige Prozesse übrig bleiben. Deren Parameter sind dann allein aus den Erhaltungssätzen heraus berechenbar.

Wir betrachten hierzu das Beispiel von N identischen Kugeln (ohne innere Freiheitsgrade[¶]), die Energie ausschließlich in mechanischer Form aufnehmen und abgeben können (vgl. Abschnitt 3.3.2). Dann gilt

$$E_{gesamt} = \frac{m}{2} \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad , \quad P_{gesamt} = M \cdot \sum_{i=1}^N v_i \quad (2.10)$$

m : Masse einer einzelnen Kugel

Wir diskutieren der Einfachheit halber nur den 1-dimensionalen Fall, in dem Bewegungen nur in einer Richtung (positiv oder negativ) möglich sind. Wenn bei $N = 2$ im Ausgangszustand (1) eine der beiden Kugeln ruhte, die andere dagegen die Geschwindigkeit v besaß, dann gehorchen die Geschwindigkeiten der beiden Kugeln im Endzustand (2) den Gleichungen

$$P_{gesamt}^{(1)} = M \cdot v = P_{gesamt}^{(2)} = M \cdot (v_1^{(2)} + v_2^{(2)}) \quad (2.11)$$

$$E_{gesamt}^{(1)} = \frac{m}{2} \cdot v^2 = E_{gesamt}^{(2)} = \frac{m}{2} \cdot [(v_1^{(2)})^2 + (v_2^{(2)})^2] \quad (2.12)$$

Dies sind 2 Bestimmungsgleichungen für die beiden Unbekannten $v_1^{(2)}$ und $v_2^{(2)}$. Das Gleichungssystem besitzt nur die Lösungen

$$v_1^{(2)} = 0 \quad , \quad v_2^{(2)} = v \quad (2.13)$$

[¶]Damit ist gemeint, daß die Kugeln außer über die Translationsbewegung weder Energie noch Impuls aufnehmen oder abgeben können.

$$v_1^{(2)} = v \quad , \quad v_2^{(2)} = 0 \quad (2.14)$$

D.h. bei einem Stoßprozess werden Energie und Impuls komplett von der 1. Kugel auf die 2. übertragen. Nach dem Stoß ruht jetzt die Kugel, die sich vorher bewegte. Die beiden Kugeln haben lediglich ihre Rollen vertauscht.

Ein analoges Ergebnis erhält man bei einem System aus mehr als 2 Kugeln. Die Beweisführung ist zwar nicht mehr ganz so einfach, da z.B. bei $N = 4$ auch nur 2 Bestimmungsgleichungen für die nun 4 Unbekannten v_1 bis v_4 vorgegeben sind. Eine sorgfältige mathematische Analyse zeigt aber, dass es für den 1-dimensionalen Fall außer der trivialen Lösung, in der lediglich die Kugeln ihre Rollen austauschen, keine weiteren Lösungen gibt. War also der Ausgangszustand z.B. durch

$$v_1 = v_2 = v \quad , \quad v_3 = v_4 = 0 \quad (2.15)$$

gegeben, so wird das Ergebnis eines Stoßprozesses immer darin bestehen, das (irgend) 2 Kugeln die Geschwindigkeit v besitzen und die restlichen beiden ruhen. Das Interessante an dieser Diskussion besteht nun darin, dass dieses manchen Neuling äußerst überraschende Ergebnis ausschließlich auf Basis der Erhaltungssätze für Energie und Impuls erhalten wurde, und durch die Annahme, dass diese Größen ausschließlich in Form von mechanischer Energie (Abschnitt 3.3.2),

$$dE = M \cdot dP \quad (2.16)$$

beschränkt auf eine Ortskoordinate, ausgetauscht werden können. Das bedeutet aber, dieses Ergebnis ist für alle Objekte gültig, die diese Annahme erfüllen, unabhängig von ihrer sonstigen physikalischen Struktur, also z.B.

1. für ein System aus N Kugelpendeln gleicher Pendellänge und -masse, die in einem Abstand gleich dem Kugeldurchmesser zueinander aufgehängt sind (Abb. 4); lenkt man n Kugeln ein kleines Stück innerhalb der Pendelebene aus, so werden nach dem Rückprall dieser Kugeln genau n Kugeln am Ende des Kugelpakets ausgelenkt;
2. für einen exakt zentral ausgeführten Stoß einer Billardkugel gegen eine 2. von identischer Masse;
3. für die Zerstrahlung eines Elektron/Positron-Paars, die mit betrags-gleichem, aber entgegengesetztem Impuls auf einander treffen und einander unter Emission von elektromagnetischer Strahlung vernichten: Der Gesamtimpuls des Systems ist vor dem Stoß $= 0$, also auch nach dem Stoß. Die einzige Konfiguration, die die Impulserhaltung erfüllt, sind offenbar 2 Photonen mit betrags-gleichem Impuls, aber entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung.

Der Versuch des Physikers, sich bei der Suche nach der Antwort auf eine gestellte Frage (zunächst) auf die geschickte Nutzung von Erhaltungssätzen zu beschränken, liefert daher nur vordergründig eine minderwertigere Antwort in dem Sinne,

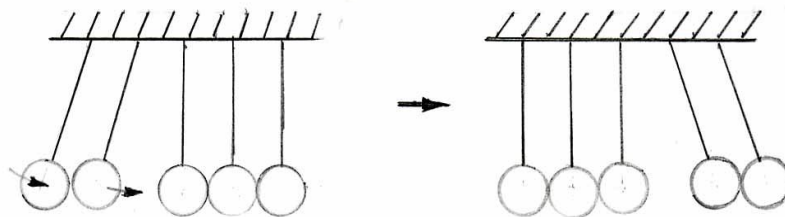


Abb. 4 N-faches sog. Fadenspendel aus N Kugeln, die in einem Abstand voneinander aufgehängt sind, der gleich dem Kugeldurchmesser ist.

dass gar nicht versucht wurde zu klären, was bei dem Prozess im Inneren des Systems abgelaufen ist. Wenn gezeigt werden konnte, dass das Ergebnis des Prozesses gar nicht davon abhängt, was hierbei im einzelnen z.B. auf mikroskopischer Skala abgelaufen ist, dann ist dies für die physikalische Erkenntnis eher eine höher- als eine minderwertigere Antwort. Diese Erkenntnis besagt nämlich z.B., dass das Ergebnis des Prozesses unverändert bleibt, selbst wenn der derzeit dominierende mikroskopische Vorgang durch einen anderen abgelöst wird.

In der Tat werden uns die Erhaltungssätze bei der Behandlung physikalischer Fragen nicht mehr verlassen. Besonders eindrucksvoll werden wir den Nutzen dieser Vorgehensweise bei der Behandlung des globalen Erdklimas (Abschnitt 8.8.2) erkennen. Dort wird es uns gelingen, allein durch Ausnutzen von offensichtlich geltenden Energie- und Massebilanzen bereits ein erstaunlich aussagekräftiges Modell dieses Klimageschehens zu konstruieren.

2.5 Mathematik - die Muttersprache des Physikers (*)

Der Physiker erhebt den Anspruch, die reale Welt quantitativ zu beschreiben, oder - etwas bescheidener formuliert - Experimente angeben zu können, deren Messergebnisse er quantitativ exakt (vgl. Kapitel 2.3) vorhersagen kann. Um diesem Anspruch gerecht werden zu können, muss er seine Gesetze und Modelle in Form von mathematischen Gleichungen formulieren. Die verbale Be- und Umschreibung bleibt für das Verständnis der Zusammenhänge weiterhin nötig und hilfreich, sie alleine reicht aber für ein wirkliches bis auf den Grund der Theorie reichendes Verständnis nicht aus. Ohne eine ausreichende Kenntnis der mathematischen Hilfsmittel ist daher eine ernsthafte Auseinandersetzung mit physikalischen Fragestellungen und Theorien kaum möglich. Bereits bei einer populärwissenschaftlichen Darstellung physikalischer Zusammenhänge ist eine wenigstens annähernd exakte Formulierung ohne die Verwendung mathematischer Begriffe äußerst schwierig, wenn nicht unmöglich. Für eine mehr als nur heuristische Darstellung der Mechanik und Elektrodynamik benötigt

man zumindest die Differenzial- und Integralrechnung; die allgemeine Relativitätstheorie ist ohne den Kalkül der Differentialgeometrie kaum formulierbar; die Behandlung von etwas komplizierteren Festkörperphänomenen wie die elektrische Doppelbrechung benötigt dringend die Methoden der linearen und multilinearen Algebra (Vektor- und Tensorrechnung); und die Sprache der Quantenmechanik schließlich ist die der mathematischen Theorie der verallgemeinerten linearen Vektorräume und der Theorie der Distributionen. Allerdings muss zur richtigen Einschätzung des Verhältnisses zwischen Mathematik und Physik (und damit zwischen Mathematikern und Physikern) darauf hingewiesen werden, dass in vielen Fällen mathematische Methoden von Physikern bereits benötigt wurden, bevor die dazu gehörende logisch korrekt entwickelte mathematische Theorie überhaupt vorlag.

Als Isaac Newton im Jahr 1684 seine Theorie der Mechanik und Gravitation entwickelte, benutzte er hierzu die von ihm selbst konzipierte *Fluxionsrechnung* ([3]). Eine mathematisch korrekte Theorie der Differenzial- und Integralrechnung war nämlich noch nicht vorhanden. Und als *Paul Adrien Maurice Dirac* (*1902 in Bristol; † 1984 in Tallahassee/Florida(USA)) um 1930 seine Konzeption der Quantenelektrodynamik entwickelte, benötigte er Funktionen, für die es wieder (noch) keine logisch saubere mathematische Theorie gab, z.B. die später nach ihm benannte δ -Funktion mit den Eigenschaften

$$\delta(x) = 0 \quad \forall x \neq 0 \quad (2.17)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) \cdot dx = 1 \quad (2.18)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot \delta(x) \cdot dx = f(0) \quad \forall f \in \{\text{geeignete Funktionenklasse}\} \quad (2.19)$$

Funktionen wie die δ -Funktion wurden später als *Distributionen* bezeichnet, in Anlehnung an eine der typischen Problemklassen, bei denen dieser Typ von Funktionen auftritt, nämlich die Feldtheorie von Ladungsverteilungen. Ihre Theorie wurde in den Jahren 1945 - 50 von *Laurent Schwartz* (*1915 in Paris; † 2002 ebenda) ([6]) entwickelt. Im Rahmen dieser Theorie wurde natürlich auch die Frage geklärt, wie die in der Gl. 2.19 aufgeführte *geeignete Funktionenklasse* definiert ist.

Diese und weitere Beispiele zeigen, dass der Physiker im Zweifelsfall relativ großzügig mit der Frage umgeht, ob eine bestimmte mathematische Operation, vorzugsweise die Vollziehung eines Grenzübergangsprozesses, überhaupt in der angewandten Weise durchgeführt werden darf. Er überlässt die Überprüfung der mathematischen Korrektheit seiner Vorgehensweise der Zukunft und den Mathematikern und konzentriert sich auf die Frage, ob die mit Hilfe dieses Vorgehens erzielten Ergebnisse der experimentellen Prüfung standhalten. D.h. er betreibt eine Art von *experimenteller Mathematik*. Dabei macht der Physiker dann aber auch schon einmal

die Erfahrung, dass ihn diese pragmatische Vorgehensweise in eine logische Sackgasse getrieben hat. Hierzu möchte ich an dieser Stelle nur ein relativ einfaches, aber auf den ersten Blick dennoch verwirrendes Beispiel anführen. Später werden wir dann Beispiele kennenlernen, die wesentlich schwieriger zu durchschauen sind.

Wir betrachten 2 Kondensatoren, die über verlustfreie Leitungen und einen verlustfreien Schalter miteinander verbunden sind, s. Abb. 5. Beide Kondensatoren

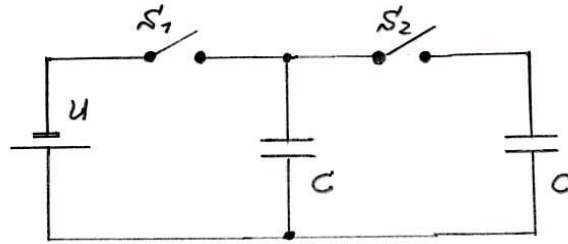


Abb. 5 Ladungsausgleich zwischen 2 Kondensatoren (Schaltskizze)

haben die gleiche elektrische Kapazität C . Im Anfang sei der Kondensator (1) auf die Spannung U aufgeladen, der Kondensator (2) sei entladen. Dann gilt (s. Gl. 4.146)

$$U_1(t=0) = U \quad ; \quad Q_1(0) = C \cdot U \quad ; \quad \Rightarrow E_1(0) = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (2.20)$$

$$U_2(t=0) = 0 \quad ; \quad Q_2(0) = 0 \quad ; \quad \Rightarrow E_2(0) = 0 \quad (2.21)$$

Zur Zeit t werde der Schalter S_2 geschlossen. Nachdem der dann einsetzende Ladungsausgleich beendet ist, sind beide Kondensatoren auf die gleiche Spannung $U_1(t) = U_2(t)$ aufgeladen, deren Zahlenwert man mit Hilfe der Ladungserhaltung ausrechnen kann:

$$\begin{aligned} Q_1(0) + Q_2(0) &= C \cdot U = Q_1(t) + Q_2(t) = 2 \cdot C \cdot U_1(t) \\ \Rightarrow U_1(t) &= \frac{U}{2} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Wenn wir nun allerdings die Energien vor und nach dem Umlegen des Schalters miteinander vergleichen,

$$E_1(0) + E_2(0) = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (2.23)$$

$$E_1(t) + E_2(t) = 2 \cdot \frac{C \cdot (U_1(t))^2}{2} = \frac{C \cdot U^2}{4} \quad (2.24)$$

so stellen wir fest, dass sich die Energie halbiert hat. Wo also ist die Energiedifferenz $E(0) - E(t)$ geblieben? Wir haben die Verbindungsleitungen und den Schalter als verlustfrei angenommen, so dass sie als Energiesenke ausfallen.

Der Ausweg aus diesem Dilemma besteht in der Einsicht, dass hier ein Grenzübergang in der falschen Reihenfolge durchgeführt wurde: Es wurde bereits **vor** Beginn der Rechnung der Zuleitungswiderstand auf Null gesetzt! Wenn man statt dessen einen endlichen Widerstand R der Zuleitung annimmt und die Problemstellung erneut durchrechnet, wird man feststellen, dass in diesem Widerstand während des Umladevorgangs genau die Energie

$$\int_0^{\infty} [I(t)]^2 \cdot R \cdot dt = \frac{C \cdot U^2}{4} \quad (2.25)$$

umgesetzt wird und zwar unabhängig vom Wert R ! D.h. wenn man jetzt den Widerstandswert sehr klein werden lässt - wodurch der Umladeprozess immer schneller abläuft - bleibt die Frage nach dem Verbleib der Energie dennoch immer beantwortet^{||}.

Vielleicht ist der Leser geneigt, dieses Beispiel als konstruiert abzutun. Es hat aber exakt dieselbe logische Struktur wie eine Vielzahl von physikalischen Fragestellungen, die die Physiker über lange Zeit vor fundamentale Probleme gestellt haben oder noch stellen. Ich nenne hier insbesondere das Problem der *Phasenübergänge*, das wir im Abschnitt 8.4.8 behandeln werden. Wie wir dort lernen werden, dürfte es nach der gängigen Entwicklung der statistischen Thermodynamik gar keine Systeme mit metastabilen Zuständen und somit auch keine sog. Phasenübergänge 1. Art geben, also z.B. auch kein Sieden oder Schmelzen eines Materials. Die experimentelle Erfahrung lehrt uns aber das Gegenteil. Es bedurfte der später als *Wilson-Renormalisierung* bezeichneten Methodik, um an dieser Stelle die Theorie der statistischen Thermodynamik mit der experimentellen Erfahrung in Einklang zu bringen. Hiedurch wurde klar, dass auch an dieser Stelle unbedingt die verschiedenen für die Problemlösung erforderlichen Grenzübergangsprozesse in der richtigen Reihenfolge ausgeführt werden müssen. *Kenneth G. Wilson* (* 1936 in Waltham/Ma (USA); heute Ohio State University (USA)) erhielt für diese Arbeiten 1982 den Nobelpreis für Physik.

Der Einsatz von mathematischen Beziehungen, mit deren Hilfe das Ergebnis einer physikalischen Überlegung in einem oder einigen Zahlenwerten zusammengefasst wird, hat eine weitere fundamentale Konsequenz: Wird nämlich einem Physiker eine aus der realen Welt entnommene Frage gestellt etwa von der Form

Ist die Erscheinung A eine unmittelbare Folge der Erscheinung B ?

so wird er diese in der Weise beantworten, dass er ein Modell des für diese Fragestellung relevanten Teils der realen Welt aufstellt und alle seiner Einschätzung nach nicht relevanten Effekte vernachlässigt. Im Anschluss an diese Problem-Vereinfachung wird er das Ergebnis berechnen. Sofern er wissenschaftlich korrekt vorgeht,

^{||}Bei der realen Durchführung dieses Experimentes würden ab dem Unterschreiten eines gewissen Widerstandes die Energieverluste durch elektromagnetische Abstrahlung relevant werden und schließlich dominieren.

wird er das Ergebnis zusammen mit einer Darstellung seiner Vorgehensweise mitteilen. Jeder, der dieses Ergebnis überprüfen will, kann nicht nur diesen Rechengang überprüfen. Er kann auch durch weitere eigene Überlegungen nachprüfen, ob die benutzten Vereinfachungen und Vernachlässigungen überhaupt zulässig sind. Die quantitative Vorgehensweise, d.h. der Einsatz der Mathematik ist also der Garant dafür (oder sollte es zumindest sein), dass die wissenschaftliche Auseinandersetzung sachlich bleibt.

Eine rein verbal begründete Beantwortung derselben Fragestellung ist dagegen immer eine im Grundsatz willkürlich konstruierte Argumentationskette, die ein komplexes und oft mehrfach vernetztes Ursache/Wirkungs-System *mit Gewalt* auf einen unikausalen Zusammenhang zusammenpresst, ohne nachprüfbar zu belegen, dass gerade die heraus gegriffenen Effekte die aktuell relevanten sind, und dass die Vernachlässigung aller übrigen Effekte zulässig ist. Bereits aus diesem Grunde wird meiner Einschätzung nach jede rein verbal geführte Auseinandersetzung zwangsläufig unsachlich geführt.

2.6 Systeme und deren Umgebungen (*)

Der Physiker spricht fast ausschließlich von (physikalischen) *Systemen* und deren Wechselwirkung mit ihrer *Umgebung*. Diese Zweiteilung der realen Welt in Systeme und deren Umgebung ist im besonderen Maße relevant für die Konzeption der Thermodynamik (Kapitel 8.1), sie begegnet uns aber ebenso bei der Beschreibung des Materialverhaltens in äußeren Feldern, also z.B. dem dielektrischen oder ferroelektrischen Materialverhalten, dem Ferromagnetismus, der Supraleitung usw. . Das Konzept der *Systemantwort* (engl. *response*), also der Reaktion eines physikalischen Systems auf Änderungen der Umgebungs- oder Eingangsbedingungen wird uns aber auch bei der Beschreibung elektronischer Bauelemente und Baugruppen sehr nützlich sein (Kapitel 14.1). Die grundlegenden Begriffe der Systemtheorie werde ich im folgenden kurz darstellen, allerdings weitgehend ohne bereits auf die hierfür hilfreichen mathematischen Methoden näher einzugehen. Das werde ich dann im Kapitel 4.2 als Vorbereitung auf die Behandlung der elektrischen Polarisierung nachholen.

2.6.1 Begriffs-Definitionen (*)

Unter einem *System* wollen wir, wie bereits angedeutet, ein physikalisches Objekt nicht näher spezifizierter Struktur verstehen, das mit seiner *Umgebung* über eine Anzahl von physikalischen Größen verknüpft ist. Diese Größen werden nun in 3 Klassen eingeteilt:

- *Eingangsgroßen* (des Systems): Der aktuelle Wert dieser Größen wird von der Systemumgebung vorgegeben.
- *Ausgangsgroßen* (des Systems): Der aktuelle Wert dieser Größen wird vom System vorgegeben und zwar in Abhängigkeit der aktuellen Werte der Eingangs-

größen.

- *Einflussparameter* (der Umgebung in Bezug auf das System): Der aktuelle Wert dieser Größen wird ebenfalls von der Systemumgebung vorgegeben. Sie haben aber nur einen geringen Einfluss auf die Ausgangsgrößen des Systems und werden daher als lediglich Störeffekte auslösende Größen angesehen.

Diese Klasseneinteilung ist letztendlich willkürlich, sogar die Einteilung in Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems. Primär erzwingt ein System gewisse Zusammenhänge zwischen den N physikalischen Größen G_i , die jedem Zustand des Systems zugeordnet sind. Diese Zusammenhänge können z.B. durch n Gleichungen der Form

$$F_i(G_1; G_2; \dots; G_N) = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (2.26)$$

definiert sein. Dadurch ist die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems von N auf $N - n$ reduziert und es können im Prinzip willkürlich $N - n$ der ursprünglichen N Variablen als Eingangsgrößen des Systems ausgewählt werden. Das System legt dann den Zusammenhang zwischen den verbleibenden n Größen G_k und den Eingangsgrößen G_i fest:

$$G_k = f_k(\{G_i\} \ ; \ k \notin \{i\}) \quad (2.27)$$

Die Menge dieser Funktionen f_k wird als *Systemantwort* oder (aus dem engl. entlehnt) als *Response* bezeichnet.

Welche Größen in einem konkreten Fall vorzugsweise als Eingangsgrößen auszuwählen sind, wird durch die Art der Wechselwirkung zwischen System und Systemumgebung festgelegt.

Ein nahezu allgemein bekanntes Beispiel eines Response-Effektes und der darüber definierten Response-Funktion ist der Zusammenhang zwischen der elektrischen Spannung U , die an ein Objekt, einen *Verbraucher* (von elektrischer Energie), angelegt wird und dem durch diesen Verbraucher fließenden elektrischen Strom I . Dieser Zusammenhang oder Response

$$I = I(U) \quad (2.28)$$

darf in vielen Fällen als linear angenommen werden,

$$I = \frac{1}{R} \cdot U \quad (2.29)$$

Die in der Gl. 2.29 auftretende verbraucherspezifische Konstante R wird als dessen *elektrischer Widerstand* bezeichnet.

Dieses in seiner logischen Struktur sehr einfache Konzept der Beschreibung komplexer Zusammenhänge durch eine als *System-Response* bezeichnete Funktion hat sich als nahezu universell einsetzbar und extrem leistungsfähig erwiesen. Und wenn diese Response-Funktion durch eine lineare Funktion angenähert werden kann, kommt man bereits allein mit Hilfe der mathematischen Funktionentheorie zu überraschend

weitreichenden, allgemein gültigen Aussagen. Hierauf werde ich im Abschnitt 4.2.3 eingehen.

Insgesamt gesehen ist es nicht übertrieben zu sagen, dass dieses Konzept der System-Beschreibung die Denkweise des Physikers maßgeblich geprägt hat.

2.6.2 Rückgekoppelte Systeme (*)

Von besonderer Bedeutung und mit eigenem spezifischen Verhalten ausgestattet sind *rückgekoppelte Systeme*, also Objekte, bei denen mindestens eine Ausgangsgröße des Systems gleichzeitig als (relevante) Eingangsgröße desselben Systems wirkt. Diese Situation liegt zum einen bei jedem technischen Regelkreis vor (s. Abschnitt 14.5.3), sie ist aber auch in der Natur allgegenwärtig und wird umgangssprachlich oft als *Kreislauf* bezeichnet. Ein typisches Beispiel ist die von Biologen häufig zitierte Situation eines begrenzten Territoriums, z.B. einer Insel, in dem insbesondere 2 Tierarten leben, ein Pflanzenfresser und ein Raubtier, für das die 1. Tierart die bevorzugte Beute darstellt (s. z.B. [2]). Dann beeinflussen sich die Populationswerte dieser beiden Tierarten offenbar stark gegenseitig, und es können alle typischen weiter unten angedeuteten Effekte rückgekoppelter Systeme auftreten, z.B. eine zeitlich oszillierende Population dieser beiden Tierarten, wobei die eine gegen die andere i.a. deutlich verzögert ist. Ein deutlich komplexeres Beispiel ist das aus der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre, der Sonneneinstrahlung, der Erdrotation und aus den Luft- und Wasserströmungen (und vielen anderen Einflüssen) sich ergebende meteorologische Wettersystem unseres Planeten (s. Abschnitt 8.8.4). Hier liegen eine besondere Vielzahl sehr komplexer Rückkopplungen vor. Die Theorie rückgekoppelter Systeme wird auch als *Kybernetik* bezeichnet, sie wurde insbesondere von dem Mathematiker *Norbert Wiener* (* 1894 in Columbia/Montana(USA); † 1964 in Stockholm) und dem Physiker *Heinz von Förster* (* 1911 in Wien; † 2002 in Pescadero/USA) begründet. Bei ihrer generellen Diskussion muss auch bedacht werden, dass jede für ein räumlich ausgedehntes physikalische System geltende globale Nebenbedingung mit einer Rückkopplungswirkung gleich zu setzen ist: Gilt z.B. wegen der Massenerhaltung, dass die Summe aller Masseströme durch eine bestimmte Oberfläche gleich Null sein muss, dann bedingt die lokale Veränderung des Massestroms an einer Stelle eine kompensierende Veränderung des Massestroms an einer anderen Stelle des Gesamtsystems.

Allen rückgekoppelten Systemen gemeinsam ist das Auftreten neuer für das Gesamtsystem typischer Eigenschaften, die keines der Einzelkomponenten für sich alleine besitzt und deren Existenz daher meist auch nicht im System lokalisiert werden kann. Als einer der ersten Naturphilosophen, die dieses grundsätzliche Verhalten von Systemen erkannt haben, wird oft der griechische Naturphilosoph *Aristoteles* (*384 v.Chr. in Stageira/Makedonien; † 322 v.Chr. in Chalkis/Euboa) genannt, dem die Formulierung

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile

zugeschrieben wird. Ich nenne als relativ einfach zu durchschauendes Beispiel den aus einer Reihe von aktiven und passiven elektronischen Bauelementen zusammenge-

setzten elektronischen Oszillator (s. Abschnitt 14.5.1). Die elektrische Spannung an seiner Ausgangsklemme führt periodische, z.B. sinusförmige Oszillationen mit wohl definierter Frequenz und Amplitude aus. Diese Eigenschaft, Oszillationen ausführen zu können, besitzt keines der eingesetzten Bauelemente alleine, und in der Oszillatorschaltung ist diese neue Eigenschaft der *Oszillieren-könnens* nicht lokalisierbar. Die Zahlenwerte dieser Frequenz und Amplitude ergeben sich aus den Eigenschaften mehrerer dieser Bauelemente, wenn nicht gar aus den Eigenschaften **aller** beteiligten Elemente.

Ein meiner Einschätzung nach als gegeben hinzunehmendes Faktum unserer menschlichen Gemeinschaft ist es nun, dass wir es nicht gewohnt und auch nicht dazu bereit sind, bewusst in derartigen Kategorien rückgekoppelter Systeme zu denken (zumindest solange wir uns nicht intensiv mit dieser Problematik beschäftigt haben). Vielmehr sucht der menschliche Intellekt nach einer unidirektionalen Argumentationskette zum Beweis oder zur Deutung eines Zusammenhangs: Wenn die Veränderung *A* eintritt, dann resultiert daraus die Konsequenz *B*. Bei Systemen mit komplex strukturierten Ursache-Wirkungs-Mechanismen kann eine derartige unidirektionale Argumentationskette jedoch immer nur einen letztlich willkürlich herausgegriffenen Bruchteil der insgesamt vorhandenen Zusammenhänge erfassen. Solange also nicht erklärt werden kann, warum gerade dieser Bruchteil genommen werden **muss** und alle übrigen Zusammenhänge außer Acht gelassen werden **dürfen**, ist eine derartige Argumentation **wertlos!** Öffentlich vorgetragene Argumente zur aktuellen Wirtschaftslage eines Unternehmens oder einer Volkswirtschaft und zum daraus ableitbaren Handlungskonzept haben i.a. jedoch genau diese Struktur!

Ebenfalls allen rückgekoppelten Systemen gemeinsam ist, dass das System in mehreren qualitativ unterschiedlichen Zuständen existieren kann. So kann der elektronische Oszillator sich z.B. in den Zuständen *Ausgangsspannung zeitlich konstant*, *Ausgangsspannung oszillierend mit konstanter Frequenz und Amplitude*, *Ausgangsspannung zwischen 2 Extremwerten nahezu rechteckförmig hin und her pendelnd* befinden. In welchem dieser Zustände er sich nach Erreichen einer stationären Situation jeweils aufhält, wird durch die aktuellen Werte der Eingangsgrößen des rückgekoppelten Systems vorgegeben. Beim elektronischen Oszillator (gemeint ist eine beliebige, aber dann festgehaltene technische Konfiguration) sind dies z.B. die Versorgungsspannung, die Umgebungstemperatur und die Leistungsentnahme am Ausgang. Der Raum der möglichen Wertetupel für die Eingangsgrößen zerfällt also in unterschiedliche Bereiche (auch *Phasen* genannt), die jeweils zu einem dieser Zustandstypen gehören. Diese Bereiche können sich überlappen oder direkt aneinander stoßen. Im letzteren Fall definiert die Menge der Wertetupel, die auf dieser Grenze liegen, eine sog. *Phasengrenze 2. Ordnung*. Wenn die Bereiche sich überlappen, kann das System im Überlappungsbereich zwei verschiedene stationäre Zustände annehmen oder auch zwischen diesen wechseln! Diese Situation ist das Kennzeichen eines *Phasenüberganges 1. Ordnung*. Die Theorie der Phasengrenzen und der Phasenübergänge ist ein wichtiges, über längere Zeit nur bruchstückhaft ver-

standenes Teilgebiet der Thermodynamik, auf das ich noch näher eingehen werde (Abschnitt 8.1.16). Meiner Einschätzung nach ist das Auftreten von Stabilitätsgrenzen und Phasenübergängen eineindeutig an das Vorhandensein von Rückkopplungen gebunden: Immer, wenn in einem System signifikante Rückkopplungen vorhanden sind, muss davon ausgegangen werden, dass es Stabilitätsgrenzen des Systems gibt mit den dafür typischen Symptomen:

1. keine oder nur schwache *Vorwarnungen* bei Annäherung des Systems an die Stabilitätsgrenze;
2. plötzliche qualitative Veränderung des Systems beim Überschreiten der Stabilitätsgrenze.

Und umgekehrt muss bei jedem System, das dieses Verhalten zeigt, davon ausgegangen werden, dass Rückkopplungen existieren und eine für das Verhalten des Systems relevante Rolle spielen. Also sind alle Materialien, die in unterschiedlichen Aggregatzuständen vorkommen (fest, flüssig, gasförmig etc.) rückgekoppelte Systeme! Weil dies lange Zeit von der klassischen Thermodynamik ignoriert wurde, war sie auch nicht in der Lage, die zweifelsohne real existierenden sog. *Phasenübergänge 1. Ordnung* zu beschreiben ([?]). Erst die sog. *Wilson-Renormalisierung* ([49]), die nichts anderes darstellt als eine Einführung von Rückkopplungen in die Theorie des betrachteten thermodynamischen Systems, war in der Lage, diesen Widerspruch aufzulösen. Ich werde hierauf in Abschnitt 8.4.8 näher eingehen.

Die strenge Verknüpfung von Rückkopplung und Phasenübergängen ist auch ein extrem wichtiger Aspekt bei der Diskussion des Weltklimas und seiner Beeinflussung durch den Menschen, s. Abschnitt 8.8.1. Auch in diesem Falle kann man aus der Tatsache, dass sich die beobachtbaren klimatischen Veränderungen bisher noch in Grenzen halten, keinerlei Sicherheit schöpfen für die Hoffnung, dass der nächste Phasenübergang des Systems Weltklima, der dann mit drastischen Veränderungen verknüpft sein wird, noch relativ weit entfernt sei. Gerade dieser Aspekt aber ist meiner Einschätzung nach bis heute von der Politik noch nicht einmal im Ansatz verstanden worden. Hier bleibt noch eine Menge an Überzeugungsarbeit zu leisten. Die Zeit drängt allerdings sehr.

2.7 Tipps, Tricks und Spezialitäten (*)

Wie ich bereits im Abschnitt 1.5 erläutert habe, enthält dieses Kapitel einige spezielle Ergänzungen, die der eilige Leser auch zunächst überschlagen kann, ohne befürchten zu müssen, dadurch bei den nachfolgenden Heften in Verständnisschwierigkeiten zu geraten. Den Abschnitt 2.7.1 sehe ich als eine nützliche Hilfe für das Lösen physikalischer Berechnungen an und den Abschnitt 2.7.4 als eine gute Vorbereitung auf die Auswertung von Praktikumsversuchen.

2.7.1 Der Umgang mit dimensionsbehafteten Gleichungen (*)

Als Vorbemerkung zu diesem Abschnitt erläutere ich die von mir gewählte unterschiedliche Verwendung der Begriffe (physikalische) *Dimension* und *Einheit*. Die Dimension einer physikalischen Größe ist immer eindeutig festgelegt, wobei i.a. mehrere einander äquivalente Formulierungen möglich sind. Z.B. hat die Energie u.a. die Dimension *Kraft · Länge* oder auch *Spannung · Stromstärke · Zeit*. Der Wert einer physikalischen Größe ist das Produkt aus einem *Zahlenwert* und einer *Einheit*, z.B.

$$E = 25 \cdot (W \cdot s) \quad (2.30)$$

Die in einer Zahlenwertgleichung auftretende Einheit ist also das Ergebnis einer konkreten Auswahl aus der Vielzahl an möglichen Einheiten zu derselben physikalischen Dimension.

Bei der konkreten Ausführung physikalischer Berechnungen müssen immer wieder Größen in ihren Einheiten umgerechnet werden, z.B. m in μm , $Watt \cdot s$ in $N \cdot m$ oder - schon weniger einfach - psi (pounds per square inch) in Pa usw., immer wieder eine beliebige Quelle für Rechenfehler** ([10]). Ich rate dem Leser, von Anfang an wie nachfolgend beschrieben vorzugehen und davon auch nach jahrelanger Übung nicht abzulassen:

In die Gleichung werden die physikalischen Größen zunächst in den primär vorliegenden Einheiten eingesetzt und zwar immer als Produkt von Zahlenwert und physikalischer Einheit. Danach wird diese Gleichung so oft und in geeigneter Weise mit Ausdrücken multipliziert, die mit der dimensionslosen Zahl 1 identisch sind, bis durch Herauskürzen von identischen Einheiten die berechnete Größe in der gewünschten Einheit übrig bleibt. Mit dem dimensionslosen Zahlenwert 1 identische Ausdrücke sind z.B.

$$\frac{10^6 \cdot \mu m}{1 \cdot m} \quad ; \quad \frac{1 \cdot Pa}{1 \cdot N \cdot m^{-2}} \quad (2.31)$$

In den Aufgaben 1 und 2 ist eine derartige Berechnung explizit durchzuführen. Diese Vorgehensweise wirkt vielleicht etwas bürokratisch, sie führt aber immer fehlerfrei zum Ziel! Sie ist übrigens auch bei nicht primär physikalischen Berechnungen hilfreich und bewahrt uns vor der Versuchung, es bei so einer Gelegenheit einmal wieder mit der sog. *Dreisatzrechnung* aus der Grundschule zu versuchen.

Lineare Winkel und Raumwinkel sind, wie wir im Kapitel 2.1 gelernt haben, dimensionslose Verhältnisse. Ich möchte aber dringend raten, die auch vom SI-Einheitensystem als *ergänzende SI-Einheiten* empfohlenen Einheiten *Radiant (rad)* bzw. *Steradian (sterad)* immer zu benutzen. Anderenfalls nämlich haben z.B. in der Strahlungsphysik die Gesamtstrahlungsleistung einer Quelle und deren Strahlungsleistung pro Raumwinkeleinheit dieselbe Dimension, eine Quelle für beliebig viele Fehler

**Die Marssonde Mars Climate Orbiter z.B. ist auf Grund eines solchen Fehlers, dem fehlerhaften Umrechnen von metrischen in englische Maßeinheiten, im Herbst 1999 während des Einschwenken in den Orbit verschollen und vermutlich auf dem Mars zerschellt.

und Mißverständnisse! Insbesondere im Bereich des täglichen Lebens ist anstelle der Einheit *rad* für den linearen Winkel die Einheit *Grad* ($^{\circ}$) mit den Untereinheiten (Bogen-) *Minute* ($'$) und (Bogen-) *Sekunde* ($''$) gebräuchlicher:

$$60' = 1^{\circ} \quad ; \quad 60'' = 1' \quad (2.32)$$

Es sei angemerkt, dass diese Untereinheiten in keinerlei logischem Zusammenhang stehen mit den Untereinheiten der Zeiteinheit *Stunde* (*h*), außer dass (zufällig ?) die Umrechnungsfaktoren (Gl. 2.32) dieselben sind. Für den Zusammenhang zwischen *rad* und $^{\circ}$ gilt die Umrechnungsbeziehung

$$\frac{\pi \cdot rad}{180^{\circ}} = 1 \quad (2.33)$$

Diese identische Kennzeichnung zweier unterschiedlicher Größen wird dann problematisch, wenn beide in einer Fragestellung gemeinsam, aber weiterhin mit unterschiedlicher Bedeutung auftauchen. Das ist z.B. in der astronomischen Messtechnik der Fall, wenn es darum geht zu berechnen, um wieviel (Bogen-)Minuten sich die Position eines Sterns verschiebt, wenn die Messung an demselben Ort auf der Erdoberfläche erfolgt, aber um eine Zeitdifferenz einiger (Zeit-)Minuten verschoben.

2.7.2 Richtiges Publizieren und Patentieren (*)

Ziel des im primären Wissenschaftsbetrieb^{††}, also an Universitäten oder nicht-industriellen Forschungsinstituten tätigen Forschers ist es, die Ergebnisse seiner eigenen wissenschaftlichen Arbeit durch deren Publikation in anerkannten wissenschaftlichen Zeitschriften der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zu präsentieren und dadurch zur Diskussion zu stellen. Die Anerkennung seiner Arbeit erfährt er, indem seine an einen Wissenschaftsverlag eingereichten Artikel zur Publikation akzeptiert werden und durch die Beachtung, die diese Veröffentlichungen erfahren, z.B. indem sie von anderen Autoren zitiert werden oder indem Wissenschaftler durch persönliche Kontaktaufnahme zusätzliche Informationen anfragen. Im Gegensatz dazu ist das Ziel des in der industriellen Produktentwicklung tätigen Forschers, im Rahmen des ihm von der Firmenleitung zugestandenen Gestaltungsrahmens neue Produkte und/oder Produktionstechniken zu entwickeln oder bereits gefertigte Produkte und/oder bereits genutzte Produktionstechniken zu verbessern. Um die hierbei gefundenen neuen oder verbesserten Produkte oder Produktionstechniken auch kommerziell nutzen zu können, und um sich gegen eine vorzeitige Nutzung dieser Möglichkeiten durch andere Unternehmen zu schützen, wird er in jedem Fall seine Arbeitsergebnisse durch eine ausreichende Anzahl von Patentanmeldungen absichern. Für beide soeben skizzierten Gruppen von Forschern ist die jeweils angeführte spezifische publizistische Tätigkeit eine Selbstverständlichkeit. Dass es mir dennoch angebracht scheint, einige Worte über das Publizieren und Patentieren zu verlieren, hat insbesondere folgende Gründe:

^{††}Ich habe Zweifel, ob es überhaupt gerechtfertigt ist, diesen Teil der Wissenschaft als den *primären* Wissenschaftsbetrieb zu bezeichnen. Aber mir ist keine bessere Formulierung eingefallen.

- Der im Wissenschaftsbetrieb tätige Forscher denkt nur in Ausnahmefällen daran, Teilergebnisse seiner Arbeit als Patent anzumelden.
- Der in der Industrie tätige Produktentwickler schreibt nur selten Publikationen.
- Die große Zahl der in der Industrie im Dienstleistungsbereich tätigen Wissenschaftler schreibt meist - bis auf wenige Ausnahmefälle - weder Publikationen noch Patente.

Meine nun folgenden Ratschläge sind also primär für diejenigen angehenden Wissenschaftler gedacht, für die später das Schreiben von Publikationen und/oder Patenten nicht zur täglichen Arbeit gehören wird.

Nahezu jeder im Dienstleistungsbereich tätige Wissenschaftler macht den Fehler, dass er die Relevanz seiner Arbeitsergebnisse im Vergleich zu denen der im primären Wissenschaftsbetrieb tätigen Kollegen unterschätzt. Und da er nur selten die Muße hat, die mit seinem Aufgabengebiet verbundene Literatur in aller Sorgfalt und Ausführlichkeit zu verfolgen, neigt er zu der Einschätzung, dass seine Ergebnisse für das Funktionieren des Unternehmens, für das er arbeitet, sehr wohl wichtig sind, die wissenschaftliche Öffentlichkeit aber weniger interessieren. Diese Einschätzung ist aber sehr oft völlig unbegründet. Ich rate daher jedem Industriephysiker, zumindest alle 1 bis 2 Jahre über eine Publikation eines publikationswürdigen Detailergebnisses seiner Arbeit nachzudenken. M.a.W. ich gehe davon aus, dass es ein derartiges ausreichend relevantes und interessantes Ergebnis nahezu immer gibt! Die größte Schwierigkeit hierbei dürfte sein, die Veröffentlichungsgenehmigung der Unternehmensleitung zu erhalten. Den größten Nutzen erzielt das Unternehmen meiner Einschätzung nach aus derartigen Publikationen dadurch, dass deren Autor auf diese Weise im Wissenschaftsbetrieb bekannt wird bzw. bleibt und dadurch erst in der Lage ist, auf Tagungen und durch persönliche Besuche Informationen aus dem Wissenschaftsbetrieb abzuschöpfen und für das Unternehmen nutzbar zu machen. Wissenschaftlicher Informationsaustausch ist kein Einbahnstraßenverkehr, sondern nur durch *wechselseitigen* Wissenstransfer möglich.

Allerdings steht der Publikationen für wissenschaftliche Zeitschriften schreibende Industriephysiker vor einer besonderen intellektuellen Herausforderung: Er darf diese Publikationen nämlich auf keinen Fall in dem Stil schreiben, der für seine internen Berichte, insbesondere für die an das Management gerichteten *Reports* seit einiger Zeit unverzichtbar ist. Die Rückkehr zu Formulierungen in wissenschaftlicher Strenge und die saubere Trennung von Fakten und Deutungshypothesen wird ihm aber vermutlich sogar Vergnügen bereiten und ihm auch bei seiner anschließenden täglichen Arbeit nützen. Generell möchte ich jedoch gegen eine überzogene Vorsicht in der Formulierung von Deutungsvorschlägen wissenschaftlicher Experimente oder neuer theoretischer Ansätze sprechen. Sich selbst relativierende Formulierungen sind oft primär versteckt angelegte Rückzugswege, um im Fall des Irrtums die

eigene Aussage nachträglich relativieren zu können. Ich plädiere für eine klare Formulierung der eigenen Deutung in dem Bewusstsein, dass diese sich später durchaus als falsch herausstellen kann. Wissenschaftlicher Fortschritt bedeutet immer wissenschaftliche Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Deutungsansätzen. Und bei dieser Auseinandersetzung behalten nicht immer die Repräsentanten der aktuellen Lehrmeinung recht. Stellvertretend für viele verwandte Vorkommnisse in der Wissenschaftsgeschichte nenne ich 2 Beispiele aus der Theorie der Supraleitung:

Auf der *International Conference on Low Temperature Physics* in London 1962 hielt der englische Physiker *Brian David Josephson* (* 1940 in Cardiff/Wales(UK); z.Zt. Cavendish Laboratory in Cambridge(UK)), damals Research Student am Royal Society Mond Laboratory in Cambridge bei Prof. Brian Pippard, einen Vortrag über seine theoretischen Berechnungen des elektrischen Verhaltens eines Systems aus 2 schwach gekoppelten Supraleitern. Eine wichtige Vorhersage dieser Rechnungen war das Auftreten eines Wechselstroms zwischen diesen beiden Supraleitern, sobald an den Kontakt eine Gleichspannung angelegt wird. Der Ausdruck für die dabei auftretende Frequenz enthält außer dem Wert der angelegten Gleichspannung ausschließlich Naturkonstanten, s. Abschnitt 7.15.3. Dieser Vortrag wurde von den anwesenden wissenschaftlichen Supraleitungs-Kapazitäten verrissen, teilweise wurde die Tagungsleitung beschimpft, einen derartigen Unsinn überhaupt als Vortrag zugelassen zu haben. 3 Jahre später ([14]) wurden Josephsons Vorhersagen von *Ivar Giaever* (* 1929 in Bergen/Norwegen; z.Zt. Rensselaer Polytechnic Institut New York (USA)) erstmals experimentell bestätigt. Josephson erhielt für seine bahnbrechenden Arbeiten 1973 den Nobelpreis für Physik.

Der russische Physiker *Aleksei Aleksejewitsch Abrikosov* (* 1928 in Moskau; z.Zt. Argonne National Laboratory, Argonne/Il.(USA)) berechnete 1953 als *Junior Scientist* auf Basis der sog. Ginzburg-Landau-Theorie der Supraleitung (Abschnitt 8.1.16) die später nach ihm benannte regelmäßige Struktur aus normalleitenden und supraleitenden Bereichen, die sich in sog. Typ-II-Supraleitern einstellt, sobald sie sich in einem ausreichend starken Magnetfeld befinden. Sein damaliger Institutsleiter und späterer (1962) Nobelpreisträger *Lew Davidowitsch Landau* (* 1908 in Baku; † 1968 in Moskau) hielt das Resultat dieser Berechnungen für Unsinn und zögerte deren Publikation bis 1957 hinaus. Glücklicherweise war bei dieser Fragestellung Abrikosov bis dahin noch niemand zuvorgekommen und er erhielt in Anerkennung dieser Arbeiten 2003 den Nobelpreis.

Ein Patent ist die Offenlegung einer Erfindung. Als Gegenleistung dafür, dass der Erfinder diese Information der Allgemeinheit zugänglich macht, erhält er das zeitlich begrenzte Monopol für die wirtschaftliche Nutzung seiner Erfindung. Damit eine Erfindung patentfähig ist, muss sie *neu* sein, auf einer *erfinderischen Tätigkeit* beruhen und *gewerblich anwendbar* sein. Wissenschaftliche Theorien und Erkenntnisse sind daher nicht patentfähig. Gegenstand von Erfindungen sind *Erzeugnisse, Vorrichtungen, Verfahren, Verwendungen* (z.B. die Verwendung eines Wirkstoffs für eine bisher nicht vorgesehene Indikation) und *Anordnungen* (von gewissen

Bestandteilen zu einem Ganzen). Auch bei der Überlegung, ob eine eigene Entdeckung patentfähig ist oder nicht, ist übertriebene persönliche Bescheidenheit fehl am Platz. Auch ich habe mehrfach den Fehler begangen und eine erfinderische Tätigkeit für nicht ausreichend neu und erfinderisch eingeschätzt, musste dann aber nach einiger Zeit feststellen, dass einem Anderen zeitlich danach für dieselbe Idee ein Patent erteilt worden war. Die Entscheidung sollte man primär davon abhängig machen, ob einem der mit der Abfassung der Anmeldung verbundene Arbeitsaufwand den erhofften persönlichen Vorteil Wert ist. Wenn eine kommerzielle Nutzung im eigenen Unternehmen möglich erscheint, sollte man in jedem Fall anmelden. Aber selbst eine als denkbar angesehene Möglichkeit der Lizenzvergabe sollte bereits für eine positive Entscheidung ausreichen. Da bei einer Patentanmeldung das Anmeldedatum noch wichtiger ist als bei einer wissenschaftlichen Veröffentlichung, sollte man mit der Literatur- und Patentrecherche nicht mehr Zeit verlieren als unbedingt nötig ist. Es genügt völlig, wenn man in der Lage ist, in der Anmeldung den unverzichtbaren Abschnitt über den *Stand der Technik* zu schreiben. Die aus der Sicht des Patentamtes relevante Literatur wird dem Anmelder dann im Zuge des Prüfungsverfahrens mitgeteilt. Im Übrigen besteht die Kunst des Abfassens von Patent-Ansprüchen darin, den Hauptanspruch zunächst einmal so umfassend wie möglich zu formulieren, ihn aber mit einer Fülle von Unteransprüchen zu unterfüttern. Dann hat man genügend Rückzugsmöglichkeiten auf einige dieser Ansprüche, auf die man sich mit dem Prüfer einigen kann, falls dieser den Hauptanspruch nicht gelten lässt. Patentschriften haben eine ganz bestimmte Struktur und einen besonderen Formulierungsstil, der mit dem einer wissenschaftlichen Publikation absolut nichts gemein hat. Diese Vorgehensweise lässt sich am einfachsten dadurch erlernen, dass man sich von einem guten Patent-Anwalt einige von ihm als gut beurteilte Patentschriften nennen lässt. Den eigenen Text entwirft man dann einfach derart, dass man diesen Vorlagetext Abschnitt für Abschnitt in die analoge Aussage des zu schreibenden Patent *übersetzt*. Ich habe das Schreiben von Patenten auf genau diese Weise erlernt und zwar an Hand einer hervorragenden internen Broschüre der Bayer AG ([12]), die leider niemals veröffentlicht wurde. Für eine erste Orientierung schlage ich einen Blick in [13] vor. Bei der Abfassung des Patenttextes verwendet man vorzugsweise an den richtigen Stellen genau die bereits im deutschen Patentgesetz genannten Begriffe, damit der Prüfer zweifelsfrei weiß, wovon die Rede ist. Z.B. sollte der Hauptanspruch immer einen der o.a. Begriffe *Verfahren*, *Vorrichtung* etc. enthalten. Außerdem führe man jeweils explizit aus, in welchem Sinne die Erfindung *neu* ist, auf einer *erfinderischen Tätigkeit* beruht und *gewerblich anwendbar* ist.

Ich schließe diesen Abschnitt mit dem Hinweis auf einige typische Schwierigkeiten, die die Umsetzung von neuen Ideen in die gesellschaftliche Realität erschweren und oft auch unmöglich machen. Dabei sind im Wissenschaftsbetrieb durchaus ähnliche Mechanismen wirksam wie in der Welt der industriellen Produktion. Damit eine Idee Anerkennung und Anwendung findet, muss sie trivialerweise neu sein. Überraschenderweise darf sie aber auch nicht **zu neu** sein, nicht zu weit entfernt von

den bisherigen eingetretenden Pfaden der Erkenntnis und der Vorgehensweise. Dann nämlich wird ihr nicht geglaubt, sie findet keine Fürsprecher und ihre Umsetzung verläuft im Sand. Denn ganz ohne institutionelle, finanzielle oder zumindest ideelle Unterstützung wird der Inhaber dieser Idee zum Außenseiter, zur Kuriosität, aber nicht zum erfolgreichen Wissenschaftler. Gelegentlich fehlen auch noch die technischen Hilfsmittel, um die Idee effektiv umzusetzen. Als Beispiel hierfür nenne ich die Erfindung des konfokalen Lichtmikroskops 1961 durch *Marvin Lee Minsky* (* 1927 in New York City/NY(USA); heute MIT Cambridge/Mass. (USA)), s. Abschnitt 11.11.4. Ohne eine ausreichend intensive Punktlichtquelle - der Laser war noch nicht erfunden - konnte er nur die prinzipielle Funktionsfähigkeit dieses Konzeptes demonstrieren, aber kein für eine reale Anwendung taugliches Gerät aufbauen.

Die Idee darf aber auch nicht zu spät kommen, selbst wenn sie dann immer noch neu ist. Denn die Umsetzung einer Idee zur **Ablösung** einer eingeführten und kommerziell erfolgreichen Technik ist extrem schwierig. Zum einen muss die neue Technik aus dem Stand heraus alle Qualitätsmerkmale erreichen und zumindest in Teilen sogar übertreffen, für deren Erreichen die eingeführte Technik oft Jahrzehnte Zeit hatte und auch benötigte. Und alles dies muss die neue Technik auch noch unter Herstellungskosten erfüllen, die nach Möglichkeit unter denen der bisherigen Technik liegen sollen. Ein typisches Beispiel für die Wirkung dieses Mechanismus ist das Schicksal des 1926 durch den Ingenieur *Felix Wankel* (* 1902 in Lahr; † 1988 in Lindau) erfundenen Wankel-Motors, also des Verbrennungsmotors, bei dem die bewegten mechanischen Teile keine Auf- und Ab-Bewegung ausführen sondern eine Rotation. Dieses ohne Zweifel wesentlich bessere Basiskonzept konnte sich kommerziell nicht durchsetzen, weil der Wankel-Motor trotz der von der Leitung der beteiligten Firmen zugebilligten mehr als 40 Jahre Entwicklungs- und Optimierungszeit (!) keine entscheidenden Vorteile gegenüber den konventionellen Hubkolbenmotoren erreichen konnte. Dieses generelle Problem hat sich seitdem noch wesentlich verschärft. Denn bei der heute generell dominierenden Sichtweise in der Unternehmensführung wird keiner neuen Produktidee auch nur ein Bruchteil dieser 40 Jahre an Entwicklungs- und Optimierungszeit zugebilligt werden.

Schließlich muss jede Idee auch noch in der richtigen ihr wohlgesonnenen Umgebung artikuliert werden, sonst findet sie von vorn herein nicht genügend viele genügend einflussreiche Fürsprecher und kann sich gar nicht erst entfalten. Als Beispiel für diesen Mechanismus nenne ich einen persönlich beobachteten Vorgang in einem großen deutschen Chemie-Unternehmen. Mitte der 90-er Jahre berichtete ein junger Wissenschaftler auf einem internen Forschungskolloquium über seine Studie zum Konzept polymerer Datenspeicher extremer Speicherdichte der Größenordnung $\frac{1\text{-Bit}}{\text{nm}^2}$, nämlich dem Einschreiben und Lesen der Daten nach dem STM-Prinzip (s. Abschnitt 11.11.4). Sein Vortrag erlitt ein ähnliches Schicksal wie der Vortrag von Josephson 1962 auf der London-Konferenz, er wurde von den anwesenden Forschungs-Managern verrissen. Im Jahr 2002 berichteten nun Binnig et al. über Arbeiten, die das identische Konzept einsetzen und von IBM unterstützt werden ([11]). Danach

arbeiteten mehrere Unternehmen an diesem Konzept, eine Markteinführung wurde noch vor 2010 erwartet.

An dieser Stelle nehme ich mir einmal das Recht heraus, über eine ganz persönliche analoge Erfahrung zu berichten. Ende der 90-er war ich im Zuge meiner Arbeiten zur Bildanalyse mikroskopischer Aufnahmen auf das Konzept des logarithmischen Bildeinzugs gestoßen. Da ich in früheren Jahren im Bereich der Produktionskontrolle photographischer Materialien gearbeitet hatte, wurde mir sofort klar, dass dieses Konzept für die digitale Photographie von enormem Vorteil sein müsste, s. Abschnitt 11.9.2. Ich habe darauf hin dieses Konzept (konzernintern) dem verantwortlichen Forschungsmanager vorgetragen. Ich konnte ihn von der Relevanz und dem wirtschaftlichen Potenzial dieses Konzeptes nicht überzeugen. Tatsache ist, dass dieses Konzept bis heute zumindest im Consumerbereich der Digitalphotographie noch immer nicht umgesetzt worden ist.

Trotz all dieser desillusionierenden Hinweise appelliere ich an meine Leser, sich bei der Formulierung ihrer eigenen Ideen nicht entmutigen zu lassen und fordere sie auf, diese hartnäckig zu verfolgen, auch und gerade **gegen** die vielschichtigen Widerstände aus ihrer Umgebung. Sie befinden sich dabei in bester Gesellschaft. Wir alle sollten jeden Einwand gegen unsere Arbeit und deren Ergebnisse Ernst nehmen und selbstkritisch bedenken. Selbstüberschätzung ist eine tödliche Gefährdung auch für jeden wissenschaftlich Arbeitenden. Einwände, die uns nicht überzeugen, sollten wir jedoch ertragen, bis zur nächsten Überprüfung zur Seite legen und während dessen mit unserer Arbeit fortfahren.

2.7.3 Die Arbeitsteilung v. öffentlicher u. industrieller Forschung (-)

Naturwissenschaftliche Forschung wird heute in den industrialisierten Nationen überwiegend in 3 organisatorisch unterschiedlichen Bereichen betrieben:

1. In den Forschungslabors der Universitäten und universitätsähnlichen Ausbildungs-Einrichtungen;
2. in den (überwiegend) öffentlich finanzierten Forschungszentren;
3. in den Forschungslabors der Industrie.

Die aktuelle Ausrichtung dieser innerhalb eines jeden Landes nebeneinander existierenden Forschungsaktivitäten ist primär ein Ergebnis der jeweiligen historischen Entwicklung. Andererseits ist unbestritten, dass die Innovationskraft eines Landes, wie immer man sie auch definieren mag, die zukünftige Wirtschaftskraft dieses Landes entscheidend bestimmen wird. Für jeden gesellschaftspolitisch Interessierten stellt sich daher die Frage, ob die in seinem Land aktuell gegebene organisatorische Dreiteilung von Forschung nach obigem Schema und deren insbesondere durch die finanzielle Ausstattung bedingte Gewichtung den optimalen (oder zumindest einen guten) Ansatz darstellt, um sich dieser Herausforderung zu stellen.

Um eine Vorstellung zu geben von der Größenordnung dieser Einrichtungen nenne ich die vom (zur 2. Kategorie gehörenden) Forschungszentrum Jülich für das Jahr 2006 publizierten Daten: Gesamtbudget $3,6 \cdot 10^8 \cdot \text{Euro}$, 4300 Angestellte.

Zum Verständnis der aktuellen Situation ist es hilfreich, sich die Entwicklung von Forschung, insbesondere von anwendungsorientierter Forschung während der letzten ca. $150 \cdot y$ in Erinnerung zu rufen. In der Frühzeit der Industrialisierung, also etwa um die Mitte des 19. Jahrhunderts, waren viele bahnbrechende Erfindungen das Werk von Einzelpersonen, die überdies hierbei, wenn überhaupt, nur wenige Hilfskräfte beschäftigten. Das gilt z.B. für die Erfindung des Telefons durch den Physiologen und Erfinder *Alexander Graham Bell* (* 1847 in Edinburgh/Schottland; † 1922 b. Baddeck/Neuschottland(Kanada)) ebenso wie für die Erfindung des Elektromotors 1834 durch den Grobschmied *Thomas Davenport* (* 1802 in Brandon/Vermont(USA); † 1851 ebenda). Erst im Zuge der wirtschaftlichen Vermarktung dieser Erfindungen resultierten hieraus große Unternehmen, die oft zu riesigen Konzernen mit 10^5 Mitarbeitern und mehr wurden. Die Führungspersonen dieser Konzerne waren anfangs oft noch mit den Erfindern der 1. Stunde identisch, und die ihnen nachfolgenden Konzernchefs hatten deren visionäre Vorstellungen von der spezifischen Aufgabe der industrie-historischen Herausforderung **ihres** Unternehmens zumindest teilweise bewahrt. Als typische Beispiele nenne ich *Henry Ford* (* 1863 im Wayne County/Mich.(USA); † 1947 in Dearborn/Mich.), *Ernst Werner von (ab 1888) Siemens* (* 1816 in Lenthe b. Hannover; † 1892 in Berlin), *Carl Friedrich Zeiss* (* 1816 in Weimar; † 1888 in Jena), *Friedrich Carl Duisberg* (* 1861 in Barmen; † 1935 in Leverkusen) und *Robert Bosch* (* 1861 in Albeck b. Ulm; † 1947 in Stuttgart).

In dieser Zeit waren öffentlich finanzierte außeruniversitäre Forschungseinrichtungen weitgehend unbekannt. Forschung fand an den Universitäten statt und - mit dem Entstehen der Industriellen Großunternehmen - zunehmend auch in der Industrie. Da etwa ab 1900 die wirtschaftliche und machtpolitische Bedeutung naturwissenschaftlicher Forschung offensichtlich wurde, gründeten die jeweiligen Regierungen in vielen Ländern große und rasch an Bedeutung gewinnende Forschungseinrichtungen. In Deutschland waren dies insbesondere die 1911 gegründete *Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft* mit (1943 insgesamt 25) über ganz Deutschland verteilten fachspezifischen Instituten. Nach dem Ende des 2. Weltkrieges wurden diese Institute unter der Bezeichnung **Max-Planck-Institut** (MPI) in die Max-Planck-Gesellschaft integriert. Um auch an dieser Stelle eine Orientierung über die Größenordnung dieser Einrichtungen zu geben, nenne ich die von der Fraunhofer-Gesellschaft für das Jahr 1986 publizierten Daten: Sie beschäftigte 1986 3200 Mitarbeiter und verfügte über ein Jahresbudget von $5,1 \cdot 10^8 \cdot \text{DM}$ (einschl. Auftragsforschung).

Die Arbeitsteilung der nun existierenden 3 Säulen von Forschungseinrichtungen nach obigem Schema wurde nicht strittig diskutiert, sondern eher als naheliegend und a priori vorgegeben angesehen:

- An den Universitäten wurde der Umfang an Forschung betrieben, den man (seit der Humboldtschen Universitätsreform) für eine fundierte und nachhaltig

wissenschaftliche Qualifikation der Universitätslehrer als erforderlich ansah. Diese wissenschaftliche Qualifikation der Universitätslehrer wurde ihrerseits als Voraussetzung dafür angesehen, dass den Studenten eine wissenschaftliche Ausbildung von hohem Niveau vermittelt werden konnte.

- Die Industriellen Unternehmen betrieben die Art und den Umfang an Forschung, den sie selbst zu ihrer wirtschaftlichen Zukunftssicherung für angebracht ansahen. Dank ihrer relativ gesicherten betriebswirtschaftlichen Situation hatten sie dabei die Möglichkeit zur Umsetzung ehrgeiziger und aufwendiger Forschungskonzepte.
- Die öffentlich finanzierten Forschungszentren betrieben sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Forschung im Rahmen der ihnen global zugewiesenen Forschungsthemen. Sie konzentrierten sich dabei insbesondere auf besonders komplexe und langfristige Projekte, die in den typischen Universitätsbetrieb schwierig integrierbar waren.

Kennzeichnend für diese bis etwa 1980 andauernde Situation ist insbesondere der enorme Forschungsaufwand der großen Industriekonzerne. U.a. entstanden auch stark grundlagenorientierte große Forschungszentren Industrieller Konzerne, z.B. das IBM-Forschungszentrum in San Jose/Cal.(USA) oder die Bell Laboratories Inc. in Murray Hill und Holmdel, beide in N.J.(USA). Als eines von vielen Beispielen in Deutschland verweise ich auf das 1988 fertiggestellte Pflanzenschutz-Zentrum der Bayer AG in Monheim b. Leverkusen mit 1.800 Mitarbeitern (1988). Als typisches Ergebnis dieser unternehmerischen Forschungspolitik nenne ich die Erfindung des Transistors 1947/48 durch die zu dieser Zeit in den Bell Laboratories in Murray Hill arbeitenden Physiker John Bardeen (* 1908 in Madison/USA; † 1991 in Boston), Walter Houser Brattain (* 1902 in Amoy/China; † 1987 in Seattle/Wa.(USA)) und William Bradford Shockley (* 1900 in London; † 1989 in Stanford/Cal.(USA)). Vermutlich hat keine Erfindung des 20. Jahrhunderts die menschliche Gesellschaft stärker verändert als das Ergebnis der Arbeit dieser 3 Männer, die hierfür 1956 den Nobelpreis für Physik erhielten. Dieses Ergebnis wäre aber nicht mehr als Arbeit eines einsamen Erfinders im Hinterhof seines Landhauses möglich gewesen. Vielmehr war ein wissenschaftliches und apparatives Umfeld erforderlich, wie es nur ein nach dem aktuellen Wissensstand optimal ausgestattetes Forschungszentrum liefern konnte. Diese Grundvoraussetzung für bahnbrechende Erfindungen gilt heute in noch stärkerem Maße. Jeder, der einmal in einem derartigen großen Forschungszentrum gearbeitet hat, hat den gewaltigen Vorteil erfahren, der für seine eigene Arbeit allein daraus resultierte, dass eine Vielzahl von experimentellen, präparativen und analytischen Methoden inclusive der dazu gehörenden Expertise in unmittelbarer geographischer und organisatorischer Nachbarschaft verfügbar war.

Etwa seit 1980 hat sich nun diese in der Vergangenheit offensichtlich recht erfolgreiche Strukturierung der anwendungsorientierten Forschung radikal verändert.

Bis dahin wurden die Industriekonzerne überwiegend von Naturwissenschaftlern geleitet, deren Ausbildung den jeweiligen Produkten entsprach: In den Vorständen großer Elektrokonzern stieß man auf Ingenieure und Physiker und der Vorstandsvorsitzende eines Chemie-Konzerns war in jedem Fall ein Chemiker. Mit der etwa ab 1980 weltweit immer erdrückenderen Dominanz der Betriebswirte in den Führungsetagen großer Unternehmen hat sich auch die unternehmerische Forschungspolitik von Grund auf verändert. I.a. werden nur noch Projekte akzeptiert, die innerhalb von wenigen Jahren einen wirtschaftlichen Erfolg versprechen. Diese Situation hat sich noch dadurch verschärft, dass im Zuge des sog. *modernem* Personalmanagements jeder Manager in mittleren oder höheren Führungspositionen von vornherein weiß, dass er nur wenige Jahre in seiner aktuellen Funktion verbleiben wird. Für seinen persönlichen Erfolg ist also das *langfristige* Schicksal seines aktuellen Verantwortungsbereichs völlig unerheblich! Er wird sich daher auf Maßnahmen konzentrieren, von denen er eine kurzfristige betriebswirtschaftliche Verbesserung des von ihm zu verantwortenden Bereichs erhoffen kann. Wie aber der Blick in die Vergangenheit zeigt, haben nahezu alle grundlegenden technologischen Durchbrüche des 20. Jahrhunderts mindestens 10 Jahre benötigt, bis sich auch wirklich ein wirtschaftlicher Erfolg einstellte. Entgegen gelegentlicher anders lautender Parolen ist die Situation auch heute nicht anders. M.a.W. in einer wachsenden Zahl von Industriellen Großunternehmen macht deren aktuelle Forschungspolitik eigene grundlegende technologische Durchbrüche unmöglich! Organisatorisch äußert sich dieses Konzept konsequenterweise auch immer häufiger darin, dass diese Großunternehmen ihre zentralen Forschungseinrichtungen ganz auflösen und ihre *Forschung* auf die anwendungsorientierte Optimierung ihrer vorhandenen Produkte beschränken. Ich möchte an dieser Stelle über die aus meiner Sicht nahezu zwangsläufigen Konsequenzen für die langfristige Entwicklung dieser Unternehmen nicht spekulieren. Unstrittig ist nach meiner Einschätzung, dass durch diese Veränderungen eine Lücke in der Forschungsstruktur auch unseres Landes entstanden ist, die es zu füllen gilt, wenn nicht die Zukunftsfähigkeit Deutschlands in Frage gestellt werden soll. Die Tatsache, dass es sich bei den geschilderten Symptomen der nur noch in kurzen Zeiträumen denkenden Unternehmenspolitik um eine weltweit auftretende extrem ansteckende Epidemie handelt, macht wohl verständlich, warum die Auswirkungen nicht schon viel drastischer geworden sind. Dies sollte uns jedoch nicht dazu verleiten darauf zu vertrauen, dass die anderen Länder auch auf Dauer weiterhin dieselben Fehler in demselben Umfang machen wie wir.

Meiner Einschätzung nach kommt daher der öffentlichen Forschung insbesondere im Bereich der langfristig konzipierten anwendungsorientierten Projekte zwangsläufig eine gewachsene Bedeutung zu. Bei der Suche nach erfolgversprechenden organisatorischen Lösungen dieses Problems darf jedoch die unterschiedliche Motivierung und persönliche Zielsetzung der beteiligten Forscher in Industrie und öffentlicher Forschung nicht übersehen werden: Der individuelle Erfinder des 19. Jahrhunderts wurde primär von seinen eigenen Ideen und Träumen angetrieben, die für den Erfolg erforderliche Arbeitsintensität und Ausdauer brachte er aus sich heraus auf. Er

betrieb seine Forschung oft als Freizeitbeschäftigung, so dass er bei der Entscheidung zur Fortführung der Arbeiten nur sich selbst verantwortlich war. Gelegentlich musste er einen oder einige wenige Geldgeber zum Durchhalten überzeugen. Der in einem öffentlich finanzierten Forschungsinstitut arbeitende Forscher muss sein Projekt in regelmäßigen Zeitabständen intern und extern verteidigen. Außerdem sieht er seinen persönlichen Forschungserfolg meist primär nicht in dem Fortgang des Projektes, sondern in einer ausreichenden Anzahl ausreichend gut platzierter Publikationen. Der in der Industrie tätige Forscher ist ständig wachsenden Zwängen ausgesetzt, weil sein Forschungsmanagement von ihm in immer kürzeren zeitlichen Abständen immer präzisere Aussagen über den voraussichtlichen Fortgang seiner Arbeiten und über die zu erwartenden betriebswirtschaftlichen Erfolge abfragt. Ich stehe jeder Art von Forschungsmanagement, also der Planung von Forschung, sehr skeptisch gegenüber, und zwar unabhängig von der Art der Finanzierung (öffentlich oder Industriell). Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass viele grundlegend neue Produkte **gegen den Widerstand der damaligen Forschungsmanager** entwickelt wurden. Im Gegensatz zur aktuellen Situation war jedoch in der Vergangenheit eine derartige Fortsetzung von Forschung gegen den erklärten Willen der eigenen Führung zumindest noch begrenzt möglich!

Andererseits ist es etwas blauäugig zu erwarten, dass in der öffentlichen Forschung etablierte Wissenschaftler ohne jede persönliche Erfahrung in aktuellen Produktionstechniken und ohne direkten Kontakt zum Markt in der Lage wären, genau diejenigen Produkte zu entwickeln, die auf dem Weltmarkt Erfolg haben können. Das von der Großindustrie (nach meiner Einschätzung ohne Not) aufgerissene Loch in der Struktur der Forschungslandschaft ist daher alles andere als leicht zu schließen. Ich sehe mich auch nicht in der Lage, einen konkreten Vorschlag zu formulieren. Meine nur schemenhaft formulierbare Einschätzung besagt lediglich, dass wir versuchen müssen, die mittelständische Industrie verstärkt in diesen Prozess einzubeziehen. Ihr Management hat heute, vermutlich besser als das der Groß-Industrie, die erforderlichen Marktkenntnisse und das Gespür für Entwicklungen, auf die der Markt wartet, eventuell ohne dass es diese Markterwartungen schon konkret formulieren kann. Der mittelständischen Industrie fehlt aber i.a. das bereits mehrfach zitierte breit gefächerte methodische Forschungspotenzial, dass für erfolgreiche Forschung heute unverzichtbar ist.

Ein Schwerpunkt zukunftsorientierter Forschungspolitik in Deutschland sollte daher meiner Einschätzung nach sein, den organisatorischen und finanziellen Rahmen zu schaffen für eine effektive Zusammenarbeit zwischen den öffentlichen Großforschungseinrichtungen und der heimischen mittelständischen Industrie.

Als Ausklang zu diesem gesellschaftspolitisch heiklen Thema möchte ich anmerken, dass die überwiegend als **fundamental verschieden** erklärten Zielsetzungen von sog. *Grundlagenforschung* und von sog. *Angewandter Forschung* meiner Einschätzung nach viel näher bei einander liegen als sie üblicherweise dargestellt werden (s. z.B. [15]). Wenn wir einmal einige b.a.w. weitab jeglicher technisch-

kommerziellen Anwendungen liegenden Gebiete der Naturwissenschaften ausklammern, z.B. die Astrophysik und die Kosmologie, dann verbleibt für die restlichen Bereiche der Naturwissenschaftlichen lediglich ein **gradueller** Unterschied zwischen der sog. Grundlagenforschung und der sog. Angewandten Forschung insbesondere in Bezug auf den vermuteten Zeithorizont, ab dem eine konkrete technische und evtl. auch kommerzielle Nutzung neu gewonnener Erkenntnisse erhofft werden kann.

Auch die für jeden herausragenden Erfolg unverzichtbare starke persönliche Triebfeder eines jeden (Grundlagen-)Forschers ebenso wie die eines jeden Erfinders technischer Vorrichtungen wird meist als fundamental unterschiedlich motiviert beschrieben: Der Grundlagenforscher strebe nach einem Gewinn an **Erkenntnis**, der Erfinder suche nach einer Lösung für eine **technische Aufgabenstellung**. Ich halte auch diese Unterscheidung für zumindest überzogen in der Formulierung und letztlich eher für einen dialektiven Winkelzug mit dem Ziel, den Erfinder gegenüber dem Forscher abzuwerten. Viele große Naturwissenschaftler der Vergangenheit waren gleichzeitig erfolgreiche Erfinder technischer Neuerungen. Einer der bedeutendsten Gelehrten der Antike, der griechische Mathematiker und Naturphilosoph *Archimedes* (* ca. 287 v.Chr. vermutlich in Syrakus; † (ermordet) 212 v.Chr. ebenda) muss zu Recht auch als Ingenieur und Erfinder bezeichnet werden. Denn er entwickelte zum einen eine Vielzahl von Kriegsmaschinen, aber auch eine Reihe von physikalischen Experimentiervorrichtungen, z.B. den optischen Hohlspiegel, und diverse technische Apparate, z.B. die sog. *Förderschnecke* zum Transport und insbesondere zum Anheben des Förderguts (z.B. Wasser zur Bewässerung von Feldern) von einem tiefer gelegenen Reservoir auf das höher gelegene Arbeitsniveau. Dieses Konstruktionsprinzip findet man auch heute nahezu unverändert in einer Vielzahl von Apparaten, z.B. der Verfahrenstechnik hochviskoser Polymerschmelzen (s. z.B. [5]). Auch der wohl berühmteste Universalgelehrte des Mittelalters, *Leonardo da Vinci* (* 1492 in Anchievo b. Vinci/Italien; † 1519 auf Schloss Clos Lucé bei Amboise/Frankreich) war auch ein begeisterter und begnadeter Erfinder. In seinen Aufzeichnungen finden sich eine Fülle von Skizzen technischer Erfindungen, u.a. von Brücken, Flugmaschinen und mechanischen Getrieben.

Meiner Einschätzung nach wird nahezu jeder Forscher, der durch seine Arbeit einen neuen grundsätzlichen Zusammenhang oder Wirkungsmechanismus aufgedeckt hat, nicht bei der Freude über diese gefundene neue Erkenntnis verharren. Vielmehr wird er bereits infolge seiner persönlichen Triebfeder auch darüber nachdenken, ob und in welcher Weise sich diese Erkenntnis in einer konkreten Anwendung nutzen lässt.

2.7.4 Fehlerrechnung (*)

Das Ergebnis eines jeden physikalischen Experimente ist ein (i.a. dimensionsbehafteter) Zahlenwert. Dieser resultiert aus der mathematischen Verknüpfung einer gewissen Anzahl von Zwischenwerten, wobei die Verknüpfungsvorschrift aus einer als richtig postulierten Theorie resultiert. Bei diesen Zwischenwerten kann es sich eben-

falls um Messwerte oder um als richtig angenommene Konstanten handeln. Will man z.B. den thermischen Längenausdehnungskoeffizienten (s. Unterabsatz S. 826) eines Metalls bestimmen, so kann man das hierfür erforderliche Experiment z.B. in der Weise ausführen, dass man

1. einen Stab aus dem relevanten Metall in reiner Form herstellt,
2. eine Möglichkeit zur Messung seiner Länge installiert, und sodann
3. diesen Stab in eine temperierbare Kammer legt und eine Möglichkeit zur Messung der Stabtemperatur vorsieht.

Danach wird man die Kammertemperatur nacheinander auf 2 unterschiedliche Werte T_1 und T_2 einstellen und jeweils die Temperatur und die Länge des Stabes messen. Als den thermischen Ausdehnungskoeffizienten α dieses Metalls deutet man dann den Ausdruck

$$\alpha(T_m) = \frac{2}{(l_1 + l_2)} \cdot \frac{l_2 - l_1}{T_2 - T_1} \quad (2.34)$$

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.35)$$

Insbesondere wird man i.a. das Ergebnis dieser Auswertung dem Mittelwert der beiden Temperaturen T_1 und T_2 zuordnen. Nach Ausführung einer derartigen Messung und ihrer o.a. Auswertung stellt sich die Frage, mit welcher *Genauigkeit* der Ausdehnungskoeffizient α auf diese Weise bestimmt wurde, oder m.a.W. *wie groß der Fehler* $\delta\alpha$

$$\alpha = (\text{Zahlenwert}) \pm \delta\alpha \quad (2.36)$$

des erhaltenen Zahlenwertes für α ist. Dieser Fehler ist zum einen durch die Fehler bestimmt, mit denen die Zwischenwerte (hier also die Werte l_i und T_i) behaftet sind. Es muss aber auch geprüft werden, ob die Annahmen, die bei der gewählten Art der Auswertung der Messdaten gemacht wurden, vielleicht bereits so stark verletzt waren, dass sie das Messergebnis signifikant beeinflussen konnten. In unserem Beispiel könnte z.B. eine Verunreinigung des benutzten Metalls bereits einen Einfluss haben oder eine inhomogene Temperaturverteilung entlang des Stabes. Schließlich könnte auch der Temperaturkoeffizient des Metalls in dem zur Messung genutzten Bereich bereits so stark temperaturabhängig sein, dass die für die Auswertungsformel 2.34 benutzte Näherung nicht mehr zulässig ist. Über all diese Fragen lassen sich im Einzelfall keine exakten und im Detail belegbaren Aussagen machen, man wird sich vielmehr mit Abschätzungen *nach bestem Wissen des Experimentators* zufrieden geben müssen. Dennoch bildet jeder Messwert erst zusammen mit einer sorgfältig durchgeführten Fehlerabschätzung ein verwertbares Ergebnis. Die Lehre von der dabei einzuhaltenden Vorgehensweise wird allgemein als *Fehlerrechnung* bezeichnet. Die hierbei angewandten Abschätzungsverfahren lassen sich meist auf Basis der *mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik* begründen (s. auch Abschnitt 7.4.10).

Zufällige Fehler (*)

Als erstes müssen wir uns mit der Unterscheidung zwischen *zufälligen* und *systematischen* Fehlern einer Messung befassen. Als zufällig bezeichnen wir alle diejenigen das Messergebnis beeinflussenden Effekte, die wir nicht in der Lage sind, gezielt zu beeinflussen. Wir gehen dann davon aus, dass deren Einfluss auch nicht konstant ist, sondern zeitlichen Schwankungen unterliegt. In unserem Beispiel könnte das z.B. der bei jeder Messung etwas unterschiedliche Blickwinkel beim Ablesen einer Längenskala sein oder der Einfluss von Regelschwankungen des Temperaturregelkreises auf die aktuelle Stablänge. Wenn wir daher die Messung unter äquivalenten Bedingungen wiederholen, liefern die dabei auftretenden Schwankungen des Messwertes einen Hinweis auf das Ausmaß dieser zufälligen Fehler. Eine derartige Serie von Wiederholungsmessungen wird man vorzugsweise so planen, dass die Versuchsbedingungen nicht völlig identisch sind. Vielmehr wird man absichtlich einige Versuchsparameter variieren, jedoch in einer Weise und in einem Umfang, dass auf Basis der als richtig postulierten Theorie noch kein signifikanter Einfluss auf das Messergebnis zu erwarten ist. In unserem Beispiel wird man z.B. die Messung jeweils bei etwas unterschiedlichen Temperaturwerten ausführen und prüfen, ob eine systematische Veränderung des Messwertes mit diesen variierten Versuchsparametern zu erkennen ist. Nur wenn dies nicht der Fall ist, darf die nachfolgend skizzierte Methode der Messdatenauswertung angewandt werden.

Wir gehen also nun davon aus, dass eine Serie von einzelnen Messergebnissen X_i derselben physikalischen Größe vorliegt, die aus einer Anzahl von sog. *unabhängigen und gleichwertigen Wiederholungen* einer Messung resultierte, und müssen die Frage beantworten, wie aus dieser Zahlenkolonne ein einziger *bester Messwert* berechnet werden kann zusammen mit einer Abschätzung seiner Zuverlässigkeit, seines *Fehlers*. Die Antwort auf diese Frage ergibt sich aus einer der Kernaussagen der Wahrscheinlichkeitstheorie: Sofern sich dieser Fehler nicht aus einer einzigen Einflussgröße oder einigen wenigen ergibt, sondern aus einer sehr großen Anzahl von Einzeleffekten, darf in guter Näherung angenommen werden, dass die relative Häufigkeit, mit der bei einer Einzelmessung ein Fehler mit einem bestimmten Zahlenwert auftritt, einen funktionellen Verlauf hat von der Form einer *Gauss-Funktion*. Diese nach dem Mathematiker *Carl Friedrich Gauss* (* 1777 in Braunschweig; † 1855 in Göttingen) benannte Funktion lautet

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(X-\bar{X})^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (2.37)$$

s. auch Abschnitt 7.4.10. Die mathematisch exakte Formulierung dieser Aussage ist Gegenstand des sog. *zentralen Grenzwertsatzes der Wahrscheinlichkeitstheorie*, s. z.B. [18] von Heft 7. Auf Basis dieses Satzes lässt sich beweisen, dass der Ausdruck

$$\hat{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.38)$$

eine *gute Schätzung* für den wahren Wert von $\langle X \rangle$ ist in folgendem Sinne: Wählt man einen beliebigen Wert von N aus und führt sodann eine große Anzahl von unabhängigen Wiederholungen einer derartigen Messsequenz von N Einzelmessungen aus, dann kommt der (ebenfalls gem. Gl. 2.38 bestimmte) Mittelwert dieser Werte \hat{X} dem Wert $\langle X \rangle$ in der aktuell vorliegenden Gaussverteilung gem. Gl. 2.37 beliebig nahe. In demselben Sinne ist

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X})^2} \quad (2.39)$$

eine gute Schätzung für den Wert σ in dieser Gaussfunktion. Diese Größe σ ist ein Maß für die im Mittel auftretende Abweichung des aktuellen Wertes X_i von dem Wert $\langle X \rangle$, mathematisch korrekt formuliert ist σ^2 gleich dem *Erwartungswert* (s. Abschnitt 7.4.10) der quadratischen Abweichung $(X_i - \langle X \rangle)^2$. Nun ist aber die durch die Gl. 2.38 definierte Größe \hat{X} ebenfalls als ein mit zufälligen Fehlern behafteter Messwert anzusehen, der daher bei einer unabhängigen Wiederholung ebenfalls Schwankungen unterworfen ist. Es lässt sich auf einfache Weise beweisen, dass \hat{X} ebenfalls gaussverteilt ist mit einer Streuung

$$\sigma(\hat{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.40)$$

M.a.W. der *mittlere Unterschied* zwischen \hat{X} und dem wahren Wert $\langle X \rangle$ beträgt

$$\delta\hat{X} = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X})^2} \quad (2.41)$$

Von einer Serie von Einzelmesswerten, von denen angenommen werden darf, dass sie sich ausschließlich infolge von zufälligen Fehlern unterscheiden, bestimmt man also als besten Schätzwert den durch Gl. 2.38 vorgegebenen arithmetischen Mittelwert und gibt als dessen Fehler die durch die Gl. 2.41 vorgegebene Größe an. Diese Art der Fehlerabschätzung ist jedoch nicht absolut zwangsläufig. Immerhin besagt die Definition von σ innerhalb der Gauss-Funktion, dass in 50 % der Fälle auch Abweichungen $|\hat{X} - \langle X \rangle| > \sigma$ auftreten. Im Sinne einer konservativeren Abschätzung ist man daher durchaus berechtigt, als $\delta\hat{X}$ einen um den Faktor 1,5 oder gar 2 höheren Wert anzugeben. Besteht die Messreihe nur aus wenigen Messwerten ($N \leq 5$), bevorzugt man vielfach anstelle der Gl. 2.41 die Gl. 2.39 für die Abschätzung von $\delta\hat{X}$. In jedem Fall sollte nur in Ausnahmefällen ein errechneter Fehler akzeptiert werden, der um mehr als eine Größenordnung kleiner ist als der Wert, der sich ergibt, wenn man die jeweilige Ableseauflösung^{††} der in die Berechnung eingehenden Einzelmessungen als Fehlerbeitrag zugrunde legt.

^{††}Bei einem Digitalinstrument ist dies der halbe Wert des letzten Bits, bei einem Analoginstrument der Wert, den man sich noch zutraut zu schätzen.

Die letztlich gewählte Auswertungsmethode sollte in der Ausarbeitung angegeben werden.

Systematische Fehler (*)

Nachdem wir bereits verstanden haben, wann wir die Schwankung eines Messwertes bei einer mehrfachen Wiederholung des Experimentes einen zufälligen Fehler nennen, ist die Definition *systematischer Fehler* offensichtlich: Es sind dies alle Messwertveränderungen, die *nicht zufällig* sind. Diese müssen wir bei der Fehlerdiskussion separat behandeln. Zunächst einmal werden wir versuchen, eine einmal erkannte systematische Abhängigkeit des Messwertes X von einer Größe I in ihrer Auswirkung dadurch zu minimieren, dass wir versuchen, während der Durchführung des Experimentes diese Größe I auf einem Wert I_0 konstant zu halten. Zum anderen aber werden wir uns durch entsprechende Hilfsexperimente eine zumindest grobe Information über den Verlauf der Funktion $X = X(I)$ zumindest in der Umgebung von I_0 beschaffen. Wenn wir dann abschätzen, in welcher Größenordnung δI sich die Schwankungen von I während einer Messung und von Messung zu Messung bewegen, kann der hierdurch bedingte Fehler von X abgeschätzt werden gem.

$$|\delta X| = |\delta I| \cdot \left| \left(\frac{\partial X}{\partial I} \right)_{I=I_0} \right| \quad (2.42)$$

Wenn möglich sollte mit allen als systematisch erkannten Fehlerquellen derart verfahren werden.

Schließlich sind auch die in eine Berechnung eingehenden Konstanten nicht fehlerfrei. Als Fehler muss zumindest die Hälfte der letzten bekannten Zahlenwertstelle angesetzt werden.

Fehlerfortpflanzung (*)

Im Laufe dieses Abschnitts haben wir bereits mehrfach davon gesprochen, dass sich die Fehler der Zwischenwerte zu dem Fehler des daraus errechneten Messwertes zusammensetzen, jedoch offen gelassen, auf welche Weise dies zu berechnen ist. Dieser Vorgang des Einmündens einer Reihe von Einzelfehler in den Fehler des daraus berechneten Resultates wird allgemein - etwas unpräzise - als *Fehlerfortpflanzung* bezeichnet. Da wir davon ausgehen, dass es sich bei den Messfehlern immer um *kleine Größen* im Vergleich zu den Werten selbst handelt, berechnen wir diese Fehlerfortpflanzung nach den Regeln der Differenzialrechnung mehrerer Veränderlicher. Wir betrachten daher nun die Funktion $X = X(m_1; \dots; m_k)$ und berechnen deren infinitesimale Änderung,

$$dX = \sum_{i=1}^k \frac{\partial X(m_1; \dots; m_k)}{\partial m_i} \cdot dm_i \quad (2.43)$$

X ist dabei der Messwert, der sich über die Funktion $X = X(m_1; \dots; m_k)$ aus den k Zwischenwerten m_1 bis m_k ergibt. Deuten wir die infinitesimalen Größen dm_i als die mit den jeweiligen Zwischenwerten m_i verbundenen Fehler, so liefert die Gl. 2.43 bereits die Vorschrift zur Berechnung des Fehlers von X . Wir müssen allerdings noch berücksichtigen, dass es sich bei den Größen dm_i um Zufallsgrößen handelt, die um den Wert 0 herum verteilt sind, also ein durch den Zufall vorgegebenes Vorzeichen haben. Daher dürfen wir die in der Gl. 2.43 auftretenden Summanden nicht einfach vorzeichenrichtig addieren. Eine konservative Annahme ist, dass sich die einzelnen Fehler entsprechend dem jeweils ungünstigsten Fall addieren. Dann gilt

$$|dX| = \sum_{i=1}^k \left| \frac{\partial X(m_1; \dots; m_k)}{\partial m_i} \right| \cdot |dm_i| \quad (2.44)$$

Wir berechnen nun einige einfache unter Verwendung der Gl. 2.44 resultierende Beziehungen und beschränken uns bei deren Herleitung der Einfachheit halber auf 2 Zwischenwerte m_1 und m_2 . Die Erweiterung auf k ist jeweils offensichtlich. Als erstes betrachten wir den Fall, dass es sich bei der Funktion $X = X(m_1; m_2)$ um eine einfache Summe handelt:

$$X = m_1 + m_2 \quad (2.45)$$

Dann folgt aus der Gl. 2.44 unmittelbar, dass

$$|\delta X| = |\delta m_1| + |\delta m_2| \quad (2.46)$$

In Worten ausgedrückt bedeutet dieses Ergebnis: *Bei einer Summenbildung addieren sich die absoluten Fehler.* Ist die Funktion $X = X(m_1; m_2)$ ein einfaches Produkt,

$$X = m_1 \cdot m_2 \quad (2.47)$$

so gilt

$$\begin{aligned} |\delta X| &= |m_2| \cdot |\delta m_1| + |m_1| \cdot |\delta m_2| \Rightarrow \\ \left| \frac{\delta X}{X} \right| &= \left| \frac{\delta m_1}{m_1} \right| + \left| \frac{\delta m_2}{m_2} \right| \end{aligned} \quad (2.48)$$

Ist die Funktion $X = X(m_1; m_2)$ ein Quotient,

$$X = \frac{m_1}{m_2} \quad (2.49)$$

so folgt

$$\begin{aligned} |\delta X| &= \frac{1}{|m_2|} \cdot |\delta m_1| + \left| \frac{m_1}{m_2^2} \right| \cdot |\delta m_2| \Rightarrow \\ \left| \frac{\delta X}{X} \right| &= \left| \frac{\delta m_1}{m_1} \right| + \left| \frac{\delta m_2}{m_2} \right| \end{aligned} \quad (2.50)$$

D.h. es gilt: *Bei einer Produktbildung ebenso wie bei einer Quotientenbildung addieren sich die relativen Fehler.* Für eine logarithmische Funktion

$$X = \log(m) \quad (2.51)$$

gilt

$$|\delta X| = \left| \frac{\delta m}{m} \right| \quad (2.52)$$

d.h. *der absolute Fehler des Ergebnisses ist gleich dem relativen Fehler des Zwischenwertes.* Dieses Ergebnis gilt nur für den sog. natürlichen Logarithmus zur Basis $e = 2,718\dots$. Bei einer Logarithmusfunktion zu einer anderen Basis b ,

$$X = \log_b(m) \quad (2.53)$$

gilt

$$|\delta X| = |\log_b e| \cdot \left| \frac{\delta m}{m} \right| \approx 0,4343 \cdot \left| \frac{\delta m}{m} \right| \quad (2.54)$$

Bei einer Exponentialfunktion schließlich

$$X = e^m \quad (2.55)$$

gilt

$$\left| \frac{\delta X}{X} \right| = |\delta m| \quad (2.56)$$

In diesem Fall ist also *der relative Fehler des Ergebnisses gleich dem Absolutfehler des Zwischenwertes.*

Jede Funktion $X = X(m_1; \dots; m_k)$ lässt sich als hierarchisch aus diesen Elementarverknüpfungen zusammengesetzt interpretieren, und entsprechend lässt sich der Fehler von X durch sequentielle Anwendung dieser elementaren Regeln ermitteln (s. Aufgabe 3).

Insbesondere wenn sich der Messwert aus einer großen Anzahl von Zwischenwerten ergibt, ist die Fehlerabschätzung nach Gl. 2.44 unverhältnismäßig konservativ. D.h. man erhält auf diese Weise eine Fehlerabschätzung, die deutlich über dem im Mittel real auftretenden Fehler liegt. Nun lässt sich aber unter gewissen, die Anwendbarkeit kaum eingrenzenden Voraussetzungen beweisen, dass sich die Streuung von X (Bezeichnung σ_X) aus den Streuungen σ_{m_i} der Zwischenwerte m_i wie folgt berechnet:

$$\sigma_X^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial X(m_1; \dots; m_k)}{\partial m_i} \right)^2 \cdot (\sigma_{m_i}^2) \quad (2.57)$$

Diese Beziehung wird üblicherweise als *Fehlerfortpflanzungsgesetz* bezeichnet. Trivialerweise ist der auf diese Weise berechnete Fehler immer kleiner als der über die Gl. 2.44 berechnete. In der Praxis geht man wieder in einer eher konservativen Weise vor: Bei nur wenigen Zwischenwerten rechnet man eher mit der Gl. 2.44 und erst ab z.B. mehr als 6 Zwischenwerten verwendet man die Gl. 2.57.

2.8 Aufgaben (-)

- (a) Der Energieverbrauch des Menschen im Ruhezustand, also ohne jede körperliche oder geistige (!) Anstrengung, beträgt etwa $1 \cdot kcal$ pro Stunde und kg Körpermasse. Berechne daraus die *Mindest-Heizleistung*, also den an die Umgebung abfließenden Wärmestrom eines Erwachsenen in der Leistungseinheit W .

(b) Bei körperlicher Betätigung steigt der Energieverbrauch deutlich an. Für eine zügige Radfahrt z.B. mit einer Geschwindigkeit von $v = 43 \cdot \frac{km}{h}$ auf ebener Strecke schätzt man diesen Mehrverbrauch auf ca. $1,4 \cdot kW$. Berechne hieraus den Energieverbrauch pro zurückgelegter Strecke in den für den PKW-Verkehr üblichen Angabe $\frac{ltr.Kraftstoff}{100 \cdot km}$. Den für diesen Vergleich benötigten Heizwert von Benzin findet der Leser im Kapitel 8.11
- Ausgerechnet in einem der französischen Departements mit der höchsten Anzahl von Sonnenscheinstunden pro Jahr, dem Departement *Les Landes* (40), startete die Préfecture im Jahr 2002 unter dem Motto *bien éclairé en plein jour* eine Kampagne, dass alle Fahrzeuge das ganze Jahr über auch am Tage mit Abblendlicht fahren sollten. Diese Kampagne wurde dann mit der Begründung abgebrochen, dass der dadurch resultierende erhöhte Treibstoffverbrauch nicht zu verantworten sei.

Schätze die sich real ergebende relative Verbrauchserhöhung bei dieser Fahrweise ab. Verwende hierzu die bei heutigen Kraftfahrzeugen typischen Kennwerte und den im Kapitel 8.11 genannten Heizwert von Dieseldieselkraftstoff.
- (XXX: Der Text der an dieser Stelle vorgesehenen Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)
- Bei der jedes Jahr stattfindenden Radsport-Veranstaltung *Tour de France* gibt es regelmäßig Berg-Etappen mit zu bewältigenden Höhendifferenzen, die in der Summe bis zu $4000 \cdot m$ betragen. Berechne die Menge an Makkaroni, die ein Radfahrer zusätzlich zu seiner Tagesration, die für sog. Flachetappen ohne nennenswerten Höhenunterschied ausreicht, mindestens essen muss, um auch noch diesen Höhenunterschied bewältigen zu können. Verwende hierzu die Beziehung für die potenzielle Energie einer Masse in einem homogenen Gravitationsfeld

$$\Delta E = M \cdot g \cdot \Delta z \quad (2.58)$$

$$g = 9,81 \cdot \frac{m}{s^2} \quad (2.59)$$

sowie die folgenden Richtwerte:

Körpermasse des Radfahrers: $M_{\text{Mensch}} = 70 \cdot kg$

Wirkungsgrad der Maschine "Mensch": $\eta \approx 0,25$

Brennwert von Makkaroni mit Tomatensauce: $e = \frac{700 \cdot kJ}{100 \cdot g}$.

- (XXX: Der Text der weiteren, noch vorgesehenen Aufgaben ist noch nicht verfügbar.)

2.9 Zahlenwerte (-)

Längeneinheiten:

Seemeile: $1 \cdot sm = 1852 \cdot m$

englische Meile: $1 \cdot mi = 1609,344 \cdot m$

englischer Fuß: $1 \cdot ft = 0,3048 \cdot m$

englischer Zoll: $1 \cdot in = 25,4 \cdot mm$

Lichtjahr: $1 \cdot Lj = 9,460528 \cdot 10^{15} \cdot m$

astronomische Einheit: $1 \cdot AE = 1,49597870 \cdot 10^8 \cdot km$

Flächeneinheiten:

Ar: $1 \cdot ar = 10^2 \cdot m^2$ und entsprechend Hektar: $1 \cdot har = 10^2 \cdot ar = 10^4 \cdot m^2$

Volumeneinheiten:

Liter: $1 \cdot ltr = 1 \cdot dm^3 = 10^{-3} \cdot m^3$

US-amerikanische Gallon: $1 \cdot gal = 3,785 \cdot ltr$ Vorsicht: Die englische Gallon hat einen anderen Zahlenwert!

Masseneinheiten:

Tonne: $1 \cdot t = 10^3 \cdot kg$

Englische ton (= US-amerikanische long ton): $1 \cdot ton = 1,016047 \cdot t$

anglo-amerikanisches pound: $1 \cdot lb = 0,45359237 \cdot kg$

anglo-amerikanische ounce: $1 \cdot oz = 28,34952 \cdot g$

Einheiten der Geschwindigkeit:

Knoten: $1 \cdot kn = 1 \cdot \frac{sm}{h} = 1,852 \cdot \frac{km}{h}$

(XXX: Die Daten weiterer Zahlenwerte sind noch nicht verfügbar.)

2.10 Literatur (-)

1. Ernst Peter Fischer, Die andere Bildung, Ullstein Verlag 2001
2. L.Dave Mech, The wolves of Isle Royal, (1966) Reprint 2002 University of the Pacific, Honolulu Hawaii
3. John Simmons, Who is Who der Wissenschaften, Bastei-Lübbe-Taschenbuch, Bergisch Gladbach 1999, S. 21
4. Conférence Générale de Poids et Mesures, Draft Chapter 2 for SI Brochure, following redefinitions of the base units , 27.09.2010 (www.bipm.org/en/si/new_si/)
5. K. Kohlgrüber, Der gleichläufige Doppelschneckenextruder, Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Carl Hanser Verlag, München 2007
6. Wolfgang Walter, Einführung in die Theorie der Distributionen, Bibliographisches Institut Mannheim etc. 1974
7. M. Fleischmann, S. Pons, M. Hawkins, Calorimetry of the Palladium-Deuterium Heavy Water System, J.Electroanal.Chem. 287 (1990) , p. 294-351
8. P. Becker et al., Determination of the Avogadro Constant via the Silicon Route, Metrologica 40 (2003), p. 271-287
9. Ph. Morrison, Zehn^{Hoch} - Dimensionen zwischen Quarks und Galaxien, Spektrum-Verlag Heidelberg, 1993
10. R. Breuer, Editorial Spektrum der Wissenschaften April 2000, S. 3
11. P. Vettinger et al., The Millipede-Nanotechnology Entering Data Storage, IEEE Transactions on Nanotechnology 1 (2002), 1, p. 39-55
12. Erich Däbritz, Patente, wozu - wie ?, Interne Broschüre der Bayer AG, Leverkusen, 2. überarbeitete Auflage 1987
13. W. Jacobsen, R. Neigl, H. Berneth, Vorrichtung zur Erzeugung von Lichtsignalen, DE 100 63 180.0 v. 18.12.2000
14. I. Giaever, Detection of the AC Josephson Effect, Phys. Rev. 14 (1965) p. 904-906
15. Jürgen Drews, Die verspielte Zukunft: Wohin geht die Arzneimittelforschung?, Birkhäuser Verlag Berlin 1998, ISBN 3764358416

