

# Das physikalische Modell - eine quantifizierte Metapher?

Klaus Mecke

Center for Nonlinear Dynamics, University of Texas, Austin;  
Fachbereich Physik, Theoretische Physik, Bergische Universität GH Wuppertal

May 1996

S. 225-252 in W. Bergem, L. Bluhm und F. Marx (Hg.),  
*Metapher und Modell, Ein Wuppertaler Kolloquium*  
*zu literarischen und wissenschaftlichen Formen der Wirklichkeitskonstruktion,*  
Wissenschaftlicher Verlag Trier, 1996.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Das physikalische Modell</b>	<b>2</b>
1.1	Elektrodynamik . . . . .	5
1.2	Thermodynamik . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Metaphern in der Physik</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Quantitative Metaphern</b>	<b>15</b>

'Die Welt ist nicht da, um von uns erkannt zu werden,  
sondern uns in ihr zu bilden.  
Das ist eine Kantische Idee.'

G.C. Lichtenberg, J 898

'Was mich wirklich interessiert, ist, ob Gott die Welt auch anders  
hätte erschaffen können, das heißt, ob uns das Bedürfnis  
nach logischer Einfachheit überhaupt irgendwelche Freiheit läßt.'

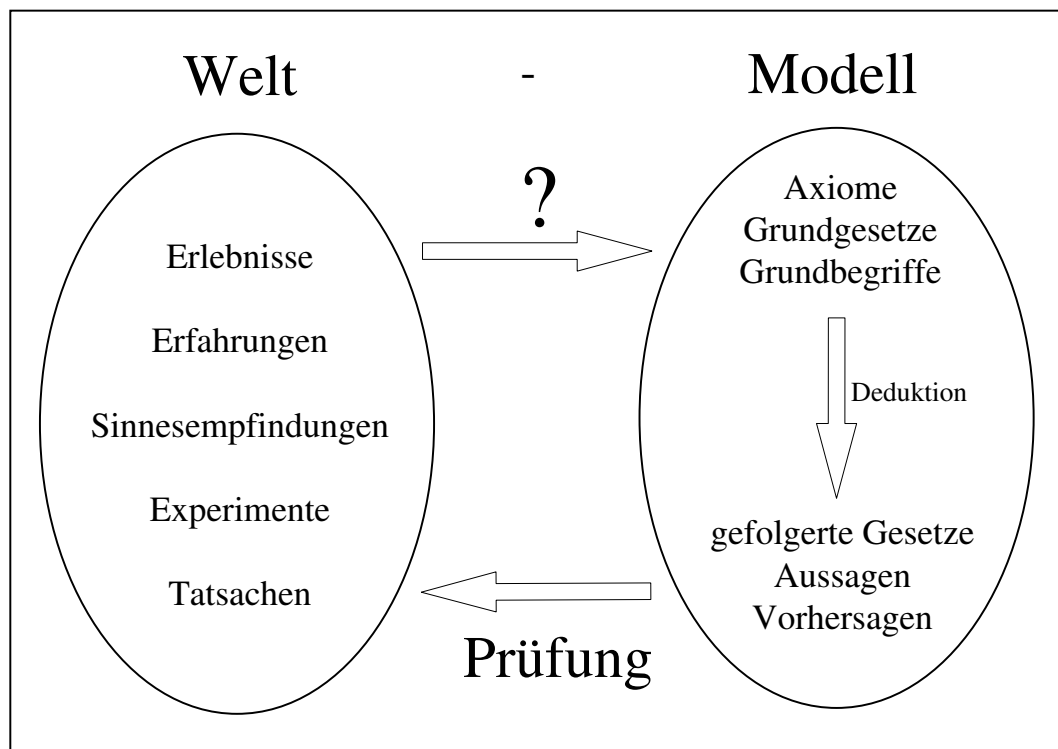
Albert Einstein

## 1 Das physikalische Modell

Der Begriff des Modells ist in den Naturwissenschaften, insbesondere in der Physik, wohl einer der am häufigsten benutzten Begriffe überhaupt. Gemeint ist meistens eine sehr spezielle Arbeit über einen sehr begrenzten Erfahrungsbereich. Allerdings folgen die meisten dieser Arbeiten dem gleichen erkenntnistheoretischen Schema, das oft auch als naturwissenschaftliche Methode bezeichnet wird und das Max Born folgendermaßen charakterisiert:

'Er [der Physiker] stellt Experimente an, beobachtet Regelmäßigkeiten, formuliert diese in mathematischen Gesetzen, sagt mit Hilfe dieser Gesetze neue Erscheinungen voraus, vereinigt die verschiedenen empirischen Gesetze zu zusammenhängenden Theorien, die unserem Bedürfnis nach Harmonie und logischer Schönheit genügen, und schließlich prüft er diese Theorien wieder durch Vorhersagen.'

Ich möchte dieses Schema, sozusagen ein Metamodell der physikalischen Modellbildung, anhand der Figur kurz skizzieren.



(1) Ausgangspunkt sind die uns gegebenen Erlebnisse, Erfahrungen oder wie Einstein es nannte **'Gewirre der Sinnesempfindungen'**; kurz die 'Welt' genannt. Ich möchte hier nicht auf ontologische, transzendente oder phänomenologische Probleme mit diesen Begriffen eingehen, sondern ganz unwissenschaftlich auf das allgemeine Verständnis von dem, was ein Gegenstandsbereich einer Wissenschaft sein mag, vertrauen. Das mit Welt bezeichnete Ei muß auch nicht die Totalität aller Erfahrungen bezeichnen, sondern kann nur einen Ausschnitt der gerade interessierenden Phänomene darstellen, im Extremfall ein einzelnes Experiment. Natürlich sind Beobachtungen nicht 'rein' gegeben, sondern modell- und kontextabhängig. Dies wird im Weiteren zu beachten sein, auch wenn diese kurze Skizze des Metamodells der Modellbildung nicht darauf eingeht.

(2) Auf der anderen Seite der Skizze befinden sich zunächst **Axiome, Grundgesetze sowie Grundbegriffe**; kurz die 'physikalische Theorie' oder auch 'Modell der Welt' genannt. In einer solchen Theorie können aufgrund ihrer logischen und mathematischen Form weitere Gesetze und Aussagen über die Welt abgeleitet werden. Dies ist ein rein deduktiver Schritt, der auch als exakt bezeichnet werden kann, wenn auf die Diskussion der mathematischen Grundlagen und Begründungszusammenhänge verzichtet wird. Die Möglichkeit solcher **Deduktionen** im Rahmen eines mathematischen Modells wird als einer der zwei Grundpfeiler der modernen Naturwissenschaft angesehen, auf denen im wesentlichen der ungeheure Erfolg beruht. Er ruft aufgrund seiner Strenge und Begrenzung aber auch Aversionen und die Kritik der 'Eindimensionalität' hervor.

(3) Der zweite wesentliche Grundpfeiler stellt die Möglichkeit der **Überprüfung** der deduzierten Sätze und Aussagen an der Erfahrung dar, d.h. die Überprüfung von Aussagen durch Experimente. Hier wird das physikalische Modell, d.h. die Theorie falsifiziert. Die Existenz eines so scheinbar unparteiischen Schiedsrichters, wie die Natur im Experiment erscheint, ist nicht nur ernüchternd angesichts der zahlreichen fehlgeschlagenen Versuche, sondern eröffnet auch den Blick auf Neues und ermöglicht so die Suche nach besseren, erfolgreicheren Theorien. Die Natur im Experiment hält das Spiel am Laufen. Aufgrund des instrumentellen Charakters dieses Schrittes und der dadurch implizierten instrumentellen Vernunft gerät Naturwissenschaft aber zunehmend in die Kritik und wird neben Umweltzerstörungen und technischen Reduzierungen vor allem auch für soziale Folgen instrumentellen Handelns wie Gewalt und Unterdrückung verantwortlich gemacht.

(4) Max Born beschrieb die Entstehung einer Theorie durch Beobachtung von Regelmäßigkeiten, deren mathematische Formulierung und anschließender Zusammenfassung. Diese Ansicht über physikalische Theorien ist leider weit verbreitet und beruht auf der Vorstellung von Physik als einer empirischen Wissenschaft, d.h. gegründet auf dem gezielt fragenden Experiment, dessen Antworten nur noch in eine 'saubere Form' gebracht werden müssen. Vermutlich entspringt einem solchen 'Experimentismus' auch die oft geäußerte Meinung, daß den Ideen Einsteins das Michelson-Morley-Experiment, sozusagen als 'Ursache', zugrunde liege; ungeachtet dessen, daß er es 1905 wahrscheinlich gar nicht gekannt hat.

Daß eine Theorie nur im nachhinein falsifiziert und nicht von vornherein verifiziert werden kann, wird in dem Diagramm durch das dicke Fragezeichen an dem oberen Pfeil angedeutet. Im Unterschied zu früheren erkenntnistheoretischen Annahmen nehmen wir heute an, daß es keinen autoritären, deduktiven oder auch rein induktiven Weg von den Erfahrungen zu den Grundbegriffen gibt. Dies ist ernüchternd, wenn der Wahrheitsgehalt einer physikalischen Theorie auf der lückenlosen Deduktion aus den Erfahrungen beruhen soll. Andererseits ist das Fehlen eines sicheren Weges auch gut und befreiend, macht es doch Wissenschaft spannend und zu einer wirklichen kreativen Leistung menschlichen Denkens. Daß es im Unterschied zu den Deduktionen im Rahmen des mathematischen Modells anscheinend keinen logischen Schritt von den Ereignissen zu den sie erklärenden Axiomen gibt, sondern höchstens einen intuiti-

ven Zusammenhang, liegt in der reduzierenden Natur der Abbildungsfunktion eines Modelles. Dies macht sich vor allem in spekulativen Sprüngen von der Vielfalt der Beobachtungen zu den wenigen sie beschreibenden physikalischen Begriffen bemerkbar. Nicht nur die gewählten Begriffe, sondern auch ihre Beziehungen untereinander sind zunächst willkürlich gewählt und müssen sich erst durch ihren Erklärungserfolg pragmatisch rechtfertigen. Um diesen Spekulationen bei der Begriffsbildung aus dem Weg zu gehen, können wir allerdings nicht im Bereich der Erfahrungen durch möglichst vielfältige Beschreibungen bleiben. Denn wir würden gerade die kreative Dimension, die Einfachheit und Geschlossenheit einer guten Theorie verlieren. Die Hinzunahme von Axiomen und Begriffen zur Erklärung von Tatbeständen ist bei einer akzeptablen Theorie in der Tat nicht beliebig und wir können sogar allgemein akzeptierte Kriterien für eine gute Theorie angeben:

(i) Zunächst muß das System der Axiome eine logische **Geschlossenheit** zeigen. Wenn auch nur eine aus ihnen gefolgerte Aussage nicht zutrifft, d.h. sich im Experiment als falsch erweist, muß das System der Axiome, das Modell, geändert werden.

(ii) Wichtiger für die Güte einer Theorie ist allerdings die **Einfachheit** des Axiomensystems. Es sollen möglichst wenige fundamentale Grundbegriffe und Gesetze nötig sein, um die Erfahrungen wiederzugeben, d.h. das System soll nur notwendige Axiome enthalten. Zahlreiche 'Ad-hoc'-Annahmen, um eine Erscheinung zu erklären, sind oft ein Indiz dafür, daß man noch nicht die richtigen Begriffe gefunden hat, daß das Phänomen noch nicht verstanden wurde. Die **Notwendigkeit** der Axiome ist daher ein immer wieder zu überprüfendes Kriterium, und eine neue Theorie beginnt oft mit der Erkenntnis der Entbehrlichkeit von Annahmen. Die Vereinfachung des Axiomensystems im Laufe der Geschichte der Physik, ja die Zusammenfassung ganz verschiedener Phänomenbereiche mit ganz verschiedenen Axiomensystemen zu einem einheitlichen Phänomen und System, trägt viel zum Erfolg und zur Faszination der Physik bei. Vollständige **Vereinheitlichung** oder die 'Einheit der Physik' ist daher zu einem wichtigen expliziten Ziel im 20. Jahrhundert geworden. Auch wenn die Möglichkeit einer letzten Einheit der Physik immer fragwürdiger wird, möchte ich doch die wichtigsten Schritte auf diesem Weg nennen:

- Die einheitliche Beschreibung der himmlischen Bewegung der Planeten und Sterne, sowie die irdische Bewegung von materiellen Körpern durch die **klassische Mechanik** und Gravitationstheorie von Newton ist wohl die klassische Revolution der Physik zu nennen. Es ist sicherlich ungerecht, immer nur die Vollender einer Entwicklung zu nennen, ohne die immensen begrifflichen Vorarbeiten zu erwähnen. So entsteht dann der Eindruck von wissenschaftlichen Revolutionen anstelle einer Evolution physikalischer Erfahrungen und Begriffe. Beginnend bei den Spätscholastikern und Kopernikus, über Kepler und Galilei dauerte diese Vereinheitlichung immerhin über 300 Jahre.

- Die Einheit von elektrischen und magnetischen Phänomenen, von Ladungen und Strömen, sowie von Licht und Farben wurde durch die **Elektrodynamik** von Faraday und Maxwell gezeigt. Es ist das klassische Beispiel für den Erfolg von Feldtheorien in der Physik.

- Die Vereinheitlichung von Wärmeprozessen und Arbeitsleistungen, von makroskopischen Phänomenen und mikroskopischen Bewegungen durch die Theorie der **Thermodynamik** und letztlich durch die Statistische Mechanik von Boltzmann ist wohl die unbekannteste Revolution physikalischer Begriffe, obgleich deren praktische Form als technische Revolution in aller Munde ist.

- Im 20. Jahrh. ist vor allem die Vereinheitlichung der Gravitationstheorie und der klassischen Mechanik durch die **Relativitätstheorie** von Einstein, sowie aller bekannten Kräfte in der Natur - bis auf die Gravitation - durch die **Quantenfeldtheorie** erfolgt. Der letzte Schritt zur Einheit der Physik - eine quantisierte, allgemeine Relativitätstheorie - schien daher in den 60-ziger Jahren nicht mehr weit.

Aufgrund der Geschlossenheit (i) und Einfachheit (ii) spricht man auch oft von der 'Schönheit' einer Theorie und meint mit dieser ästhetischen Kategorie die Freude über das geschaffene Bild der Natur. Leider wird neben den beiden genannten Grundpfeilern moderner Naturforschung dieser Bildfunktion des Modells nicht das gleiche Maß an Aufmerksamkeit geschenkt. So wird z.B. im Physikstudium oder in üblichen Darstellungen der Geschichte der Physik detailliert über Experimente und Berechnungen der klassischen Mechanik berichtet, dagegen muß für die Theoriebildung selber, d.h. für das große Fragezeichen in Abbildung (1) meistens eine Anekdote herhalten. Ich meine die Geschichte mit dem Apfelbaum und dem unter ihm träumenden Newton, der von einer herabfallenden Frucht befruchtet wird. So einfach ist das und so langweilig und dröge wird dadurch die klassische Mechanik, wenn die Axiome einfach von Himmel fallen, die Grundbegriffe kaum eingeführt werden und die Berechnung irgendwelcher fallender Äpfel übrig bleibt. Damit komme ich zum zweiten Begriff des Titels dieses Kolloquiums und zum eigentlichen Thema dieses Aufsatzes: der Metapher. Über die Natur des Fragezeichens ist schon viel in den verschiedensten Disziplinen gearbeitet worden: psychologisch, soziologisch, wissenschaftstheoretisch, .... Ich möchte und kann auch nicht die vielen Ergebnisse hier anführen. Das Thema des Kolloquiums legt es nahe, über die Funktion von Metaphern bei diesem Schritt der Modellbildung aus der Sicht eines Physikers zu sprechen. Dies bedeutet insbesondere, daß ein kleines, aber konkretes Stück physikalischer Theoriebildung dargestellt wird .

Ich werde im Weiteren auf die klassischen Beispiele physikalischer Theoriebildung, d.h. auf klassische Mechanik, Relativitätstheorie und Quantenmechanik, nicht weiter eingehen, sondern das eben kurz skizzierte Metamodell der physikalischen Modellbildung durch zwei ebenso kurze und wichtige, aber unbekanntere Beispiele erläutern: durch die Modelle der Elektrodynamik und Thermodynamik.

## 1.1 Elektrodynamik

(1) Im Gegensatz zur klassischen Mechanik, deren Erfahrungsbereich lange vor Beginn der Entstehung der Theorie bekannt war, ist die Wahrnehmung elektromagnetischer Phänomene (Welt) zusammen mit der Ausbildung der Theorie (Modell) stetig gewachsen. Zwar kannte man schon lange Kräfte von statisch aufgeladenen Körpern und magnetischen Steinen, auch wurden Licht und natürliche Entladungen wie Blitze beobachtet, aber die reichhaltige Fülle elektromagnetischer Phänomene wurde erst mit der systematischen Untersuchung derselben entdeckt. Wichtige Schritte waren dabei die Entdeckung des elektrischen Stromes durch Galvani und Ampere, sowie des elektromagnetischen Feldes mit seinen Beziehungen zu Licht und Strömen durch Faraday.

(2) Im Laufe der Forschung mit elektromagnetischen Phänomenen sind eine Reihe von empirischen Gesetzmäßigkeiten gefunden worden, so z.B. die Gesetze von Coulomb, Ampere und Gauß, sowie das Faradaysche Induktionsgesetz. Aber die vollständige mathematische Fassung der elektromagnetischen Gesetzmäßigkeiten leistete Maxwell durch die Formulierung der sogenannten Feldgleichungen

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad , \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad , \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad , \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad ,$$

wie jeder Physikstudent sie lernt und gebraucht. Wir betrachten heute die Feldgrößen  $\vec{D}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  als Bezeichnungen für die 'Stärke' einer Entität, des sogenannten elektromagnetischen Feldes. Die Faszination des Elektromagnetismus erschließt sich vor allem in der mathematischen Struktur dieser Feldgleichungen, d.h. in ihrer konzentrierten, einfachen Form. Die-

se Geschlossenheit und Einfachheit empfinden und bezeichnen Physiker als 'Schönheit' einer physikalischen Theorie.

(3) Im Studium lernt man, wie die unter (2) genannten Gesetze aus den 'fundamentalen' Maxwell-Gleichungen abgeleitet werden können, die dann im Praktikum im Einzelnen experimentell überprüft werden müssen.

(4) Die Entstehung der Theorie des Elektromagnetismus über viele Einzelgesetze zum vereinheitlichenden Grundgesetz läßt vermuten, daß die physikalische Modellbildung doch induktiv durch lauter kleine Schritte aus den Erfahrungen erfolgt und die Aufgabe der Theoretikers die zusammenfassende Formulierung ist. Allerdings muß man beachten, daß z.B. die elektromagnetische Induktion sowohl von Ampere, als auch von Faraday zwar gesehen, aber nicht wahrgenommen wurde. Erst als Faraday den Begriff des elektromagnetischen Feldes herausarbeitete, war er in der Lage, das Gesetz als solches zu erkennen. Das Entscheidende war nicht die Induktion von der Beobachtung auf das Gesetz, sondern die Schaffung eines Bildes, aufgrund dessen die Beobachtung erst seine Bedeutung bekam und das Gesetz erst formuliert werden konnte. Auf diese erkenntnisleitende Funktions der 'Feld'-Metapher werden wir später noch zu sprechen kommen.

## 1.2 Thermodynamik

*'Eine Theorie ist desto eindrucksvoller, je größer die Einfachheit ihrer Prämissen ist, je verschiedenartigere Dinge sie verknüpft und je weiter ihr Anwendungsbereich ist. Deshalb der tiefe Eindruck, den die klassische Thermodynamik auf mich machte. Es ist die einzige physikalische Theorie allgemeinen Inhalts, von der ich überzeugt bin, daß sie im Rahmen der Anwendbarkeit ihrer Grundbegriffe niemals umgestoßen wird (zur besonderen Beachtung der grundsätzlichen Skeptiker).'*

Albert Einstein

Bei einem solchen Lob, kann man eigentlich nicht umhin, die Thermodynamik als Paradebeispiel physikalischer Modellbildung zu verwenden.

(1) Wärme, d.h. das Empfinden von heiß und kalt, ist eine oft eindruckliche Sinnesempfindung. Fassen wir z.B. einen heißen Löffel an, bemerken wir eine spontane Erhöhung der Temperatur unserer Hand und stellen nach einiger Zeit fest, falls wir nicht schon losgelassen haben, daß Löffel und Hand gleichwarm geworden sind.

(2) Die Thermodynamik ist die physikalische Theorie der Wärme. Ihre Grundbegriffe sind Temperatur  $T$ , innere Energie  $U$  und Entropie  $S$ . Sie benutzt im wesentlichen zwei Grundgesetze, den 1.Hauptsatz über die Erhaltung der Energie  $U$ , sowie den 2.Hauptsatz über die Richtung spontan ablaufender Prozesse. Angewandt auf unser spezielles Beispiel des thermischen Kontaktes zweier Körper lauten sie:

(i) Der Verlust der inneren Energie  $-dU_1$  des einen Körpers ist genausogroß wie der Gewinn  $dU_2$  des anderen. Wird keine Arbeit an den Körpern verrichtet, bezeichnet man diese Übertragung von Energie auch als Wärme  $\delta Q = dU_2 = -dU_1$ . Weiterhin gilt in diesem Fall die Beziehung  $dU_i = T_i dS_i$  für die Entropieänderung  $dS_i$  und Temperatur  $T_i$  der beiden Körper  $i = 1, 2$ .

(ii) Bei allen spontan ablaufenden Prozessen eines abgeschlossenen Systems nimmt die gesamte Entropie  $dS = dS_1 + dS_2 \geq 0$  zu und erreicht ein Maximum im thermischen Gleichgewicht.

Aus diesen beiden Hauptsätzen können wir sofort folgern, daß die Temperatur der beiden Körper im thermischen Gleichgewicht gleich groß sein muß, denn es gilt

$$0 = \frac{dS}{dU_1} = \frac{dS_1}{dU_1} + \frac{dS_2}{dU_1} = \frac{dS_1}{dU_1} - \frac{dS_2}{dU_2} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = 0 .$$

Außerdem können wir aus

$$0 \leq dS = \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) dU_1$$

sofort folgern, daß  $dU_1 \leq 0$  negativ ist, wenn  $T_1 \geq T_2$  ist. D.h. die Wärme  $\delta Q = -dU_1 \geq 0$  fließt von dem Körper mit der höheren Temperatur auf den Körper mit niedrigerer Temperatur solange, bis die Temperaturen ausgeglichen sind.

(3) Die zur Überprüfung notwendigen Experimente macht wohl jeder hinreichend oft im Alltag, sodaß die Theorie sinnvoll erscheint. Doch wieviel hat man dadurch verstanden oder begriffen?

(4) Die begriffliche und bildhafte Bedeutung der Thermodynamik wurde bisher unterschlagen, da die Theorie in fertigen, wohldefinierten Gesetzen daherkam. Wichtige Bilder zum Verständnis der Theorie kommen dabei nicht ins Blickfeld. Woher kommen und was bedeuten z.B. Begriffe wie thermisches Gleichgewicht, Temperatur, Energie, Entropie, Wärme, .... ? Diese Frage betrifft die Entstehung eines physikalischen Modells und wird nur zu gerne vernachlässigt. Dabei ergeben sich gerade an dieser Schnittstelle zwischen Phänomen und Theorie die interessantesten Blickpunkte: Hier stellen sich die Fragen nach dem Wirklichkeitsbezug von Physik, nach den Einflüssen des gesellschaftlichen Kontextes oder nach der kulturellen Bedeutung von Physik. Wir werden uns daher im nächsten Abschnitt u.a. mit der Gleichgewichts-Metapher weiter beschäftigen müssen.

'Das Buch der Philosophie ist das Buch der Natur, das vor unseren Augen beständig daliegt, das jedoch nur wenige zu entziffern und zu lesen vermögen, da es in Buchstaben, die von denen unseres Alphabets verschieden sind, in Dreiecken und Quadraten, in Kreisen und Kugeln, in Kegeln und Pyramiden verfaßt und geschrieben ist.'

Galileo Galilei

## 2 Metaphern in der Physik

Wenn mathematische Buchstaben zu Worte kommen sollen, muß wohl zunächst in anderen Sprachen gesprochen worden sein. In der Umgangssprache, aber auch in der Literatur werden physikalische Sachverhalte oder Begriffe oft als Metaphern gebraucht. So spricht man z.B. von 'Spannungen' oder 'Polarisationen' der Meinungen, 'Koordinatenkreuz' von Werten, 'Quantensprüngen' der Entwicklung oder 'Gleichgewicht der Kräfte'. Oder man denke nur an die vielfältigen Metaphern für Liebe als elektromagnetisches Phänomen, wo es 'knistert' und 'funkelt', und 'Anziehung' aufgrund 'unsichtbar gespannter Fäden' geschieht. Manchmal überkommt dabei einen Physiker ein leichtes Unbehagen, wenn er Begriffe allzu falsch verstanden meint. Aber um diese Metaphern soll es im Weiteren nicht gehen, sondern um den umgekehrten Vorgang. Inwieweit spielen Metaphern aus der Sprachumgebung des Wissenschaftlers eine Rolle in seiner Arbeit.

Wenn unsere Vorfahren einen Blitz am Himmel sahen und den Donner hörten, wußten sie, daß Thor seinen Hammer schwang. Solche **Mythen** gibt es in jeder Kultur und zu zahlreichen natürlichen Phänomenen. Auch wenn wir nicht bereit sind, Mythen als wissenschaftliche Erklärungen zu betrachten, so machen sie doch deutlich, daß Menschen immer versuchten, Natur mit Bildern und Metaphern zu beschreiben und zu verstehen. Vielleicht bin ich sprachlich gar nicht soweit von einem 'göttlichen Wutausbruch' entfernt, wenn ich einen Blitz als 'Spannungsentladung eines Feldes' beschreibe.

In einem elementareren Sinne beginnt Physik mit Bildern; **Bildern** von natürlichen Erscheinungen, von Phänomenen. Seien es die Sternmuster am Himmel, das lustige Brodeln von kochendem Wasser oder die erstaunlichen Formen von Eisblumen auf Glas, alles wird mittlerweile auch wissenschaftlich interessiert betrachtet. Physiker erzeugen neue Bilder, bisher nie Gesehene, ermöglicht durch Mikroskope und Teleskope, durch Computer und Formeln. Früher wurde gezeichnet - erinnert sei an Keplers *Mysterium Cosmographicum*, die Sphärenharmonie darstellend - oder an die Skizzen der Flugbahnen bei Galilei. Heute wird eher fotografiert - am Beginn des Jahrhunderts die faszinierenden Laue-Diagramme, Kristallordnung wiedergebende Wellennatur von Röntgenstrahlen. Und das Ende des Jahrhunderts scheint geprägt von bunten fraktalen Formen und wolkigen Bildern von Atomen, aufgezeichnet durch Rastertunnelmikroskope. Bilder sind zwar keine Metaphern, ihre Notwendigkeit als Basis und Werkzeug physikalischer Forschung weist aber schon in ihre Richtung.

**Neue Gegenstände, Bilder und Formen** entstehen durch 'naturwissenschaftliches Design' und vor allem durch Technik. Alldies will bezeichnet und beschrieben werden. 'Glühbirnen', 'Leuchtstoffröhren', 'Software', 'Zündkerzen' oder 'Atomkerne' sind schon so alltägliche Metaphern, daß sie als solche gar nicht mehr auffallen. 'Apfelmännchen', 'Fraktale', 'Atomwolken' oder 'Symmetriebruch' sind vielleicht noch nicht so bekannt, nichtsdestotrotz sind es Metaphern für neu Gesehene, das bisher keinen Namen in der Sprache hatte. Ein unerfreuliches Beispiel ist die Benennung von physikalischen Großgeräten, insbesondere Teilchenbeschleuniger, mit weiblichen Vornamen wie Petra, Hera, Doris,..., zumal sie mit misogynen Assoziationen verbunden werden, wenn z.B. von 'Heras Reizen' (Bild der Wissenschaft, Bd.12, 1983) gesprochen wird. Allerdings ist dies auch ein gutes Beispiel für zunächst nicht wahrgenommene



Metaphern, die durch ungewöhnliche Verwendung als solche plötzlich bewußt werden. Daß ungewöhnliche Metaphern durchaus heftige Diskussionen unter Physikern auslösen können, zeigt die Bezeichnung der kürzlich veröffentlichten COBE-Bilder der kosmischen 'Hintergrundstrahlung' als 'Antlitz Gottes'. Was vor 30 Jahren als 'Hintergrund' bezeichnet wurde, ist heute das Wesentliche schlechthin.

Wissenschaft und Technik sind immer wieder gezwungen, neue Metaphern aus dem Bedürfnis zu schaffen, eine sprachliche Bezeichnung für eine Sache zu finden, die ursprünglich keine eigene Benennung hat. Hierzu zählen sicherlich auch die zunächst noch **abstrakten Begriffe** der 'Kraft', des elektrischen 'Feldes', des thermischen 'Gleichgewichts' oder der 'Unbestimmtheitsrelation'. Selbst der Begriff des 'Gesetzes', bei Galilei noch nicht zu finden, ist aus der Rechtspraxis übertragen. Der Wissenschaftler erschien als Richter, einen naturgesetzten Zusammenhang erkennend und anwendend. Daß diese Metaphern mehr sind als bloße Namen, daß sie eine konstruktive Erkenntnisfunktion haben, möchte ich weiter unten anhand der Metaphern des Feldes und des Gleichgewichtes deutlich machen.

Physiker benutzen Metaphern auch als Forschungsmittel. Für ein Phänomen, das man nicht versteht, werden zunächst anschauliche und vertraute Bilder zurechtgelegt. Man arbeitet z.B. mit bildhaften **Analogien**, 'das ist, wie...': Atome sind 'wie Kügelchen' und Moleküle werden durch Kalottenmodelle dargestellt - aneinandergepappte Halbkugeln. Die elektrische Anziehung zweier entgegengesetzt geladenen Körpern ist 'wie durch Gummibänder' verursacht, dargestellt durch Faraday's Eisenstäbe. Elektrische 'Ströme' werden vielleicht nicht mehr durch kleine grüne Männchen, die in Drähten laufen, versinnbildlicht, wohl aber durch einen Abhang herunterfließendes Wasser. Solche Vergleiche erscheinen zunächst nur als saloppe Abkürzungen für längere Erklärungen. So kann der elektrische Strom auch durch die Beweglichkeit von Elektronen getrieben durch Feldgradienten in metallischen Leitungsbändern beschrieben werden. Die Wasser-Metapher entsteht durch die Übersetzung von Leitungsbändern als Bachbett, von Feldgradienten als Abhang und Elektronen als Wasser. Abgesehen davon, daß in dieser Erklärung schon wieder Metaphern wie Bänder, Felder oder Beweglichkeit verwendet wurden, übersieht man bei solchen Substitutionsversuchen, daß sie nicht immer möglich sind. So fällt es mir z.B. schwer, eine Beschreibung der durch elektromagnetischer Felder vermittelten Anziehung zu finden, ohne nicht-elektrische Phänomene heranzuziehen. Dies liegt wohl vor allem daran, daß der Begriff des Feldes selber eine Metapher für elektromagnetische Erscheinungen ist, die nicht wiederum durch elektromagnetische Phänomene, sondern nur durch bereits Vertrautes beschrieben werden kann. Der Vergleich des Feldes mit gespannten Gummibändern ist daher aufgrund gemeinsamer Eigenschaften durchaus sinnvoll. So nimmt z.B. die Dichte der Bänder beim Anspannen zu und ihre Anzahl ist ein Maß für die wirkende Kraft. Daß diese Metaphern nicht nur vergleichen und ersetzen, sondern auch eine erkenntnisleitende, bzw. naturinterpretierende Funktion haben, hoffe ich später zeigen zu können.

Nicht zuletzt möchte ich in dieser kurzen Einleitung erwähnen, daß Physik die Kunst ist, **Graphiken, Diagramme oder Kurvendarstellungen** zu verstehen. Daten und Relationen werden in Kurven verdeutlicht und anschaulich gemacht. Kurvendiskussionen werden schon in der Schule gelernt und sind sehr hilfreich beim Betrachten von Daten. Auch mathematische Formeln werden in Bilder gefaßt, nicht nur um Ergebnisse anschaulich zu machen, sondern auch um mathematische Strukturen überhaupt erst zu erfassen. Feynman-Diagramme sind hierfür ein schönes Beispiel und mittlerweile auf vielen Buchumschlägen zu finden.

Vielleicht der Inbegriff naturwissenschaftlicher Darstellungsweise ist das mathematische **Symbol**, z.B. als chemisches Elementenzeichen, als physikalische Größenbezeichnung oder als 'Platzhalter' für Zahlen. Ein Symbol wird hier als wahrnehmbares Zeichen genutzt, das stellvertretend entweder für etwas nicht Wahrnehmbares oder schlicht zur Abkürzung steht. Die Bedeutung des Zeichens ist dabei entweder verabredet, oder offensichtlich, oder wird durch ein

konstruktives Verfahren gegeben. Das Signifikante eines naturwissenschaftlichen Symbols ist sicherlich seine quantitative Form. Allerdings stellt es nicht nur eine Zahl dar, sondern verweist auch durch seine 'Einheit' auf eine bildhafte Vorstellung des symbolisch Repräsentierten. Ausdrücke wie  $\Theta = 5^{\circ}C$  oder  $B = 2T$  sind nur sinnvoll, wenn man  $^{\circ}C$  als 'Grad Celcius' und  $T$  als 'Tesla' versteht, d.h.  $\Theta$  und  $B$  als quantitative Formen der Metaphern des thermischen 'Gleichgewichts' und des magnetischen 'Feldes' interpretiert. **Physikalische Größen**, wie  $\Theta$  und  $B$ , entstehen immer aus der Verbindung von quantitativen Zahlen mit verweisenden Einheiten, ohne die das Symbol sinnlos bliebe.

Diese Beispiele mögen einführend genügen, um zu verdeutlichen, daß Physik nicht ausschließlich eine abstrakte Modellbildung der Natur ist, wie es im ersten Abschnitt dargestellt wurde. Um dies zu verdeutlichen, beginnen wir noch einmal mit dem 'Gewirre der Sinneseindrücke', mit den realen Bildern, den Oberflächenphänomenen. Selbst wenn wir mit Mikroskopen versuchen, in Körper einzudringen, um ihr Wesen zu erfahren, sehen wir nur erneut wieder Oberflächen. Welche Enttäuschung muß es im 16. Jahrhundert gewesen sein, auf der Suche nach dem Inneren der Materie wieder nur Materie zu finden. Durch die Anwendung eines Mikroskops kam nicht etwa das dunkle 'Innere' zum Vorschein, sondern nur neue beschienene Oberflächen. Die so geschaffenen und gefundenen Bilder, diese 'Oberflächenbilder', müssen daher seit der Erfindung des Mikroskops für das nicht erkennbare Wesen der Materie erhalten. Heute ist es möglich, Bilder bis auf atomare Längen aufzulösen, bzw. zu vergrößern. Erinnerung sei an die geordneten Reihen der Atome eines Kristalles, die uns die Rastertunnelmikroskope neuerdings zeigen. Verstanden haben wir durch diesen Blick in das Innere eines Körpers aber noch nicht sehr viel und wir sind gezwungen andere Wege zu gehen, andere Bilder zu schaffen. Bei dem Versuch das Oberflächenbild begrifflich zu fassen und damit zu verstehen, greifen wir einen Aspekt heraus und sagen z.B., daß die Atome geordnet sind. Mit dem Begriff der 'Ordnung' ist eine bestimmte Vorstellung verbunden, die durch Metaphern weiter beschrieben werden kann. Eine militärische Parade oder auch ein Maisfeld kann assoziiert werden und beides erweitert den Bedeutungsraum von der Ordnung der Atome.

Es gibt aber auch eine spezifische quantitative Form der Assoziation, die ich '**quantitative Metaphern**' nennen möchte und ich hoffe, dies im Weiteren deutlich machen zu können. Mit der Metapher der 'quantitativen Metapher' möchte ich ausdrücken, daß z.B. die physikalische Größe 'Entropie' nicht nur irgendein quantitatives Maß, sondern die quantitative Form dessen ist, was Physiker sich unter der 'Ordnung von Atomen' vorstellen. Ein klassisches Beispiel quantitativer Metaphern sind wohl die Platonischen Körper - in der Antike als geometrische Form der Materie und noch bei Kepler als Gerüst der Sphärenharmonie. Letztlich sind aber die meisten physikalischen Größen quantitative Metaphern für Aspekte des 'Gewirres der Sinnesempfindungen', für Phänomene, Bilder und Vorgänge in der Natur. Manchmal werden die als quantitative Metaphern entstandenen Größen zu eigenen Realien oder Entitäten, wie z.B. das elektrische 'Feld'. Andere werden nur zu Eigenschaften von Körpern, wie z.B. die Temperatur als quantitative Form der Metapher des thermischen 'Gleichgewichts'. Oft bleiben sie zunächst Beschreibungen des Verhaltens von Natur in der Hoffnung auf spätere Weiterentwicklungen des Bildes, wie z.B. die Komplementarität oder auch die dynamischen Symmetrien der Quantenfelder. Keinesfalls sind diese Begriffe in der Natur vorgefunden, sondern kreativ als Beschreibungen einer zunächst diffusen Assoziation eingeführt und langsam in ein konkretes Bild und eine quantitative Form kondensiert. Die Quantifizierung gibt diesen Metaphern symbolhafte Genauigkeit ohne ihre sprachliche Bildhaftigkeit dabei zu zerstören. Die literarische Bedeutungsvielfalt von Metaphern, das Schillern der Nuancen wird durch die Quantifizierung allerdings unterbunden und die Metapher scheint auf einen eindeutigen Symbolwert reduziert. Der Verlust an Assoziationen, an Bedeutungen, an Expressivität scheint durch die Genauigkeit des Bildes ersetzt. Insofern ist es fragwürdig, diese kondensierten Metaphern weiterhin als

Metaphern, zumindest in einem literaturwissenschaftlichen Sinne, zu bezeichnen.

Bevor auf diese Frage eingegangen werden kann, möchte ich als typisches Beispiel für die Entstehung einer quantitativen Metapher das elektromagnetische Feld anführen, Grundbild aller weiteren physikalischen Forschung im 20. Jahrhundert. Ich hoffe, hinter der quantitativen Form den Metapherncharakter des Feldes deutlich machen zu können.

## Das elektromagnetische Feld

*'Before we can count any number of things, we must pick them out of the universe, and give each of them a fictitious unity by definition. Until we have done this, the universe of sense is neither one nor many, but indefinite. But yet, do what we will, nature seems to have a certain horror of partition.'*

J.C. Maxwell

Seit Newton war es üblich, Anziehung und Abstoßung von Körpern durch fernwirkende Kräfte zu beschreiben, erprobt an der Gravitationskraft weitentfernter Himmelskörper. Eine alternative Kraftvorstellung, die in der antiken Impetustheorie begründet ist, will nichts von Fernwirkungen wissen und bemüht ein fließendes Fluidum als Kraftträger, erprobt in der Dynamik von Flüssigkeiten. Doch von welcher Art ist die Natur der elektrischen und magnetischen Kraft? In der Schule wird man mit Bildern aus Eisenspänen konfrontiert, doch was dort eigentlich dargestellt ist, bleibt oft unklar. 1839 schreibt Faraday:

'Es gibt zur Zeit zwei [oder besser gesagt drei] allgemeine Hypothesen über die physikalische Natur magnetischer Wirkung. Die erste, die sich mit den Äthern befaßt und den Begriff von Fluß oder Strömungen in sich schließt, ist von Euler auf eine für den nicht mathematisch bewanderten Forscher [wie es Faraday selber war] einfache Art und Weise in seinen Briefen dargelegt worden. Nach dieser Hypothese bewegt sich das magnetische Fluidum oder der magnetische Äther in Strömen durch die Magnete sowie durch den Raum und die Substanzen um sie herum. [...]

Schließlich haben wir die Hypothese von Ampere, nach welcher elektrische Ströme um die Teilchen der Magnete herum existieren; diese Ströme, die aus der Ferne auf andere Teilchen mit ähnlichen Strömen wirken, ordnen die Teilchen in den ihnen zugehörigen Massen, womit sie solche Massen der magnetischen Wirkung unterwerfen. [...]

Meine Theorie stimmt eher mit der ersten Vorstellung überein, nimmt aber nicht so viel als erwiesen an. Sie läßt den Magneten gelten als Kraftzentrum, umgeben von Kraftlinien [...]. Diese Linien betrachtet sie als *physikalische* Kraftlinien, unentbehrlich sowohl für das Dasein der Kraft innerhalb des Magneten wie auch für deren Transport und Einwirkung auf entfernte magnetische Körper. [...] Ermuntert durch die[se] von Mathematikern gezollte Anerkennung meiner **Vorstellung der magnetischen Kräfte als Linien**, [...] wage ich nun etwas länger nachzudenken. Eigentlich wollen wir keine Mannigfaltigkeit verschiedener Methoden, die Kräfte darzustellen, sondern streben danach, die einzig wahre physikalische Bedeutung der Erscheinungen sowie die maßgebenden Gesetze festzustellen. Von den zwei Theorien, die zur Zeit am beliebtesten sind, nämlich denjenigen der magnetischen Flüssigkeit und der elektrischen Ströme, muß die eine und müssen vielleicht sogar beide falsch sein; und ich sehe nicht ein, wie der Mathematiker zwischen der wahren und falschen unterscheiden oder behaupten kann, daß überhaupt die eine oder die andere wahr ist; [...] Die von mir aufgebrachte Vorstellung kompliziert die Sache noch weiter, denn sie ist unvereinbar mit jeder der vorherigen Theorien [...]. Es liegt also auf der Hand, daß unsere physikalischen Vorstellungen sehr zweifelhaft sind. Meines Erachtens wäre es von Vorteil, wenn wir uns bemühen würden, uns von Vorurteilen zu befreien, die in ihnen enthalten sind, um die Kraft für einige Zeit so weit wie möglich in ihrer ursprünglichen Reinheit betrachten zu können.'

Faraday schreibt an anderer Stelle weiter:

'Experimentell genommen ist der bloße Raum magnetisch; [...] wenn später eine andere Vorstellung von dem Zustand des Raumes oder seiner Beschaffenheit auftauchen sollte, so muß sie in das Bild dessen einverleibt werden, was heute in Bezug auf das Experiment der bloße Raum genannt wird. Andererseits ist es, glaube ich, eine bewiesene Tatsache, daß wägbare Materie für die Existenz von physikalischen Linien magnetischer Kraft nicht unentbehrlich ist.'  
[Faraday 1839]

Der Text ist nicht nur hinsichtlich der vorsichtigen Formulierung des letzten Satzes, sowie der Offenheit gegenüber zukünftigen Vorstellungen des bloßen Raumes bemerkenswert, sondern vor allem in der Formulierung eines neuen Bildes von Kraft. Kraft ist weder Fernwirkung, noch Fluidum, sondern nur die Gesamtheit von Kraftlinien - imaginierte Gummifäden darstellbar durch Eisenspäne. Diese Linien sollen nicht material gedacht werden, aber durchaus *physikalisch* sein, d.h. ein reales Ding sein. Magnetismus scheint die Gesamtheit dieser Linien im ansonsten leeren Raum zu sein. Wir nennen heute diese materiefreie Gesamtheit von Kraftlinien ein **Kraftfeld**, bzw. in diesem speziellen Fall das elektromagnetische Feld. Faradays Vorstellung von Kraft ist zunächst nicht deutlich, da er auf keine bekannten Begriffe zurückgreifen kann. Dennoch kann er metaphorisch über sie reden und langsam als Kraftfeld bildlich realisieren. Seine leitende Idee war die Reduktion in der Vorstellung auf das unabdingbar Notwendige, d.h. möglichst frei von Vorannahmen über die Natur der Sache sich trotzdem ein Bild von ihr zu machen. Genau das ist die Stärke des Faradayschen Feldbegriffs und entspricht der ästhetischen Kategorie der notwendigen Einfachheit einer guten Theorie.

Ein weiterer wichtiger Punkt in diesem Text liegt in der beschriebenen Bedeutung der Mathematik für die physikalische Forschung. Faraday, als Autodidakt selber mit der Mathematik auf Kriegsfuß, verweist auf die Briefe Eulers, in denen man alles Wichtige ohne mathematische Techniken erfahren kann. Mathematik ist für ihn zunächst wohl nicht notwendig, um physikalisch zu forschen. Ja, er geht noch weiter und behauptet, daß Mathematik über physikalische Vorstellungen nicht richten kann, weil Physik zunächst nicht quantitativ arbeitet. Bilder, Begriffe, Vorstellungen sind relevant, nicht die in Formeln gefaßten Relationen. Trotzdem erwähnt Faraday seine Ermunterung durch Mathematiker, die ihm wohl bestätigten, daß seine Vorstellungen durchaus mathematisierbar seien. Dies hält er trotz seiner Skepsis wohl für unabdingbar. Doch dazu später.

James Clerk Maxwell schreibt später über Faraday: 'Während aber die allgemeine Entwicklung der wissenschaftlichen Methode damals in der Anwendung von mathematischen und astronomischen Ideen auf jedes jeweilige neue Forschungsthema bestand, scheint Faraday keine Gelegenheit gehabt zu haben, technische Kenntnisse der Mathematik zu erwerben. [...] Faraday also, mit seinem scharfsinnigen Intellekt, seiner Liebe zur Wissenschaft und seinen Fähigkeiten als Experimentator war daran gehindert, den Gedankengang zu verfolgen, der zu den Errungenschaften der französischen Forscher [Coulomb, Poisson, Ampere] geführt hatte, und mußte die Erscheinungen mit einer ihm verständlichen Symbolik selbständig erklären, anstatt die bisher einzige Sprache der Gelehrten zu übernehmen.

Diese neue Symbolik bestand in jenen Kraftlinien, die sich von elektrisierten und magnetischen Körpern in jeder Richtung erstrecken, und die Faraday mit seinem geistigen Auge so deutlich sah wie die festen Körper, von denen die Kraftlinien ausgehen. Der Begriff der Kraftlinie und deren Darstellung mittels Feilspäne war nichts Neues: sie waren wiederholt beobachtet und als interessante wissenschaftliche Merkwürdigkeit mathematisch erforscht worden. Wir wollen Faraday selber hören, wie er seinem Leser die Methode vorstellt, die in seinen Händen so erfolgreich wurde:

"Wenn ein Experimentator, der die magnetische Kraft unter dem Gesichtspunkt magnetischer Kraftlinien betrachten will, auf die Anwendung von Feilspänen verzichtet, so gibt er

absichtlich und unnötigerweise ein höchst wertvolles Hilfsmittel auf. Indem er sie gebraucht, kann er viele Zustände der Kraft, [...], sofort sichtbar machen [...]. Die Anwendung von Feilspänen läßt wahrscheinliche Ergebnisse sofort erblicken und liefert manche wertvolle Anregung für zukünftige wichtige Experimente.” [...]

In diesem Experiment sahen die Mathematiker nichts als eine Methode, auf einen Blick die Richtung der Resultante zweier Kräfte an verschiedenen Orten darzustellen, von denen jede auf einen anderen Pol des Magneten gerichtet ist - ein etwas kompliziertes Resultat des einfachen Kraftgesetzes.

Faraday aber, mit einer Reihe von Schritten, die ebenso für ihre geometrische Genauigkeit als auch für ihre spekulative Fähigkeit bemerkenswert sind, verließ seiner Vorstellung von diesen Kraftlinien eine weit größere Klarheit und Exaktheit, als die Mathematiker damals bei ihren eigenen Formeln anwenden konnten.

Erstens sind Faradays Kraftlinien nicht bloß als individuelle Einheiten zu betrachten, sondern als Bestandteile eines Systems, auf eine bestimmte Weise durch den Raum gezogen, so daß die Zahl der Linien, die durch eine Fläche von zum Beispiel einem Quadratcentimeter hindurchgehen, auf die Intensität der durch die Fläche wirkende Kraft schließen läßt. So ergibt sich eine bestimmte Zahl von Kraftlinien. Die Stärke eines Magnetpols mißt sich an der Zahl von Linien, die aus ihm austreten; der elektronische Zustand eines Stromkreises mißt sich an der Zahl von Linien, die durch ihn gehen. [...]

Mittels dieser neuen Symbolik definierte Faraday mit mathematischer Genauigkeit die ganze Theorie des Elektromagnetismus, und zwar in einer Sprache, die frei ist von mathematisch-technischen Fachausdrücken und sowohl auf die kompliziertesten wie auf die einfachsten Fälle anwendbar ist.’ [Maxwell 1890]

Zunächst möchte ich ausdrücklich auf Maxwells verwendete Sprache hinweisen: er spricht von ’Symbolik’, ’Sprache’, ’geistige Auge’ und ’Darstellung’ - alles Hinweise auf die metaphorische Arbeitsweise Faradays. Faraday selbst betonte, daß die Visualisierung der abstrakten Begriffe nicht nur notwendig für weitere Forschung ist, sondern, daß das Auge sogar das wichtigste Hilfsmittel des Forschens ist.

Metaphern verbinden zwei normalerweise nicht zusammenhängende Bereiche, die nun wechselseitig aufeinander bezogen werden. Der Zielbereich der Feld-Metapher ist die Natur, bzw. genauer die elektromagnetischen Phänomene, wobei durch die Metapher erst geklärt wird, was alles zu diesem Zielbereich gehört. So wird z.B. Licht als ’Welle im Feld’ und elektrostatische Anziehung von Ladungen als ’Spannung des Feldes’ erst durch die gemeinsame Feld-Metapher als zusammengehörend erkannt. Der Herkunftsbereich der Metapher ist die Vorstellung eines ’kontinuierlichen Etwas’, das nicht Materie ist, sondern höchstens an diese gebunden ist, bzw. durch sie entsteht und an ihr wächst. Die Feld-Metapher äußert sich dabei in verschiedensten Formen. Felder sind ’raumfüllend’ und erscheinen als materiefreies ’Fluidum’, als ’Kontinuum’ von ’Linien’ oder auch von ’Fasern’; ja man spricht sogar von ’Faserbündeln’. Linienfelder können ’gespannt’ werden und es treten ’Wellen’, ’Wirbel’, und ’Störungen’ auf. Felder haben ’Quellen’ und ’Senken’ und sogar ’Ränder’. Felder ’wachsen kontinuierlich’ und ’breiten sich aus’. Die Fülle dieser einzelnen Bilder, die auf elektromagnetische Phänomene sinnvoll angewandt werden können, konstituiert die Metapher des Feldes. Das Gegenbild eines Feldes ist in der Physik die klassische Teilchen-Metapher mit der Vorstellung von ’Massenpunkten’, ’Trajektorien’ und ’fernwirkende Kräften’ anstelle von ’Kontinuum’, ’Wellen’ und ’Feldstörungen’. Zwar können manche Aspekte von Licht und elektromagnetischer Anziehung auch mit Teilchen-Bildern beschrieben werden, aber die vielen nötigen Zusatzannahmen und die wachsende Zahl nicht beschreibbarer Phänomene widersprach zunehmend dem Bedürfnis nach Geschlossenheit und Einfachheit einer Theorie. Es ist wohl nicht die experimentelle Falsifizierung der Teilchen-Theorie, sondern eher die Unanschaulichkeit des Teilchen-Bildes, das

Physiker überzeugt, einer anderen Vorstellung den Vorzug zu geben. Werden elektromagnetische Phänomene und die Vorstellung eines kontinuierlichen Feldes zusammengebracht, entsteht eine völlig neue Sicht der Natur vor aller mathematischen Theorie. Dies ist die wirklich erkenntnistiftende und theoriekonstruktive Funktion der Metapher.

Ein solch erfolgreiches Bild wie die Feld-Metapher hat vor allem auch eine theorieleitende Funktion. Kein Physiker kann sich heute eine fundamentale Theorie anders denn als Feldtheorie vorstellen. Man würde ausgelacht, versuchte man etwas anderes, ähnlich wie Huygens einen schweren Stand hatte als er die Vorstellung der Wellennatur des Lichtes gegenüber Newton vertrat, für den es nur Teilchen gab. Jede erfolgreiche Metapher markiert eine neue Entwicklung in der physikalischen Sicht der Natur. Seit Faraday werden als Entitäten, die allen physikalischen Erscheinungen zugrundeliegen, nicht mehr irgendwelche idealisierten Massepunkte angesehen, sondern den ganzen Raum zu jeder Zeit ausfüllende Felder. Die Aufgabe der Physik besteht nicht mehr in der Berechnung irgendwelcher Bahnen in Raum und Zeit, sondern die Bestimmung der raum-zeitlichen Struktur des Feldes. Insbesondere wird die Vorstellung von 'fernwirkender' Materie durch ein 'nahwirkendes' Feld abgelöst. Das heißt, daß Kräfte nicht instantan auf entfernte Körper wirken, sondern sich als Störung des Feldes bis zum entfernten Körper 'fortpflanzen' müssen. Wirkungen sind nunmehr nur lokal vermittelbar und benötigen einige Zeit, bis sie sich in entfernten Gebieten bemerkbar machen können.

Vorstellungen von kontinuierlichen, alles durchdringenden Feldern und Nahwirkungen greifen im Gegensatz zu der atomistischen Vorstellung diskreter Massenpunkte wieder Bilder der antiken (stoischen) Pneumalehre auf. Es erstaunt daher nicht weiter, daß Theologen den physikalischen Feldbegriff als Metapher für das Wirken und die Immanenz Gottes in der Welt verwenden.

Aber auch Relativitätstheorie und Quantenmechanik sind nicht denkbar ohne die Vorstellung eines lokalen, kontinuierlichen Feldes. Letztlich beginnt die Revolution des physikalischen Weltbildes 1839 bei Faraday. Allerdings müssen verschiedene Metaphern für gleiche Erscheinungen kohärent sein. Man bekommt daher Probleme, wenn die Feld-Metapher auf Materie-Teilchen selber angewandt wird, wie es in der Quantenmechanik geschieht. Max Plancks 'unvernünftiger' Schritt, den Begriff der Energie, ein Begriff der Teilchen-Metapher, mit der Wellenzahl eines Feldes zu verknüpfen, war zwar mathematisch-quantitativ kein Problem, wohl aber begrifflich. Interessanterweise änderte Planck seine Bezeichnungsweise, nachdem sich herausgestellt hatte, daß dies mehr als nur eine heuristische, quantitative Annahme ist. Er änderte den Namen 'Energieelement' in 'Quantum', weil für ihn auch auf der Sprachbene eine adäquate Sicht der Dinge notwendig ist. Um solchem Sprachdilemma in Zukunft aus dem Weg zu gehen, erzeugten Physiker eine neue Metapher, das 'Quantenfeld', das beide Aspekte - Teilchen, d.h. Quanten, und Feld - vereinen sollte. Je nachdem welchen Aspekt der Metapher man betont, erscheint der Zielbereich, d.h. die Natur, in einem anderen Licht. Plancks Schritt, Energie und Wellenzahl zu verbinden, fand zunächst nur in einer Rechnung statt, aber Physiker kommen nicht darum herum, begrifflich und bildlich einzuholen, was mathematisch gerechnet werden kann. Dies ist das Dilemma der Quantenmechanik bis heute geblieben. Die Schwierigkeiten der Interpretation der Quantenmechanik ergeben sich aus der Unvereinbarkeit der notwendig verwendeten Metaphern, nicht aus ihrem Kalkül. Dies ist ein schönes Beispiel für die Selbständigkeit quantitativer Metaphern, auf deren scheinbare Autonomie wir im nächsten Abschnitt zu sprechen kommen müssen.

Ein wichtiger Aspekt der Feld-Metapher, ist die von Maxwell erwähnte quantitative Messung des elektromagnetischen Feldes durch bloßes Zählen von Linien. Auch wenn elektromagnetische Felder heute anders gemessen werden, stellt das Sichtbarmachen von zählbaren Kraftlinien einen notwendigen Schritt in der Entwicklung der Metapher dar.

'Die Elementarteilchen können mit den regulären Körpern in Platons Timaios verglichen werden. Sie sind die Urbilder, die Idee der Materie.'

Werner Heisenberg, in 'Der Teil und das Ganze'

### 3 Quantitative Metaphern

Es ist nicht erstaunlich, daß in der Physik viel über Messungen und Rechnungen, aber wenig über Begriffe und Metaphern gesprochen wird. Denn ist erst einmal eine Meßvorschrift, ein Konstruktionsverfahren oder eine Rechenmethode gegeben, kann ohne Rücksicht auf zugrundeliegende Vorstellungen gearbeitet werden. Sind Bilder erst einmal in eine quantitative Form gebracht, kann diese in mathematischer Sprache ein Eigenleben führen. Die ursprünglichen Metaphern existieren nur noch unsichtbar als Verständnishintergrund oder kondensieren in handfeste physikalische Größen, denen die metaphorische Herkunft nicht mehr anzusehen ist. Eine erfolgreiche Quantifizierung stabilisiert somit eine Metapher. Es lohnt sich daher, diesen Prozeß der Quantifizierung genauer zu betrachten.

Wieso sind manche Bilder und Vorstellungen quantifizierbar und manche offensichtlich nicht. Elektrische Felder können mittlerweile gemessen und ihre Stärke in Zahlen angegeben werden. Auch solch komplexe Formen, die als Fraktale bezeichnet werden, können quantitativ erfaßt und beschrieben werden. Betrachten wir aber die Aufnahmen vom Rastertunnelmikroskop stellt sich vor allem die Frage, was wir eigentlich sehen. Sicherlich sind die atomaren Strukturen des Materials zu erkennen. Aber sollen wir uns Atome wirklich als bauschige Wattekügelchen vorstellen? Hier erzeugt Physik Bilder, die scheinbar einfach zu verstehen sind, vielleicht aber nur eine optische Täuschung vorgaukeln. Wie können Physiker etwas visualisieren, was prinzipiell nicht sichtbar sein kann? Wir schlittern offensichtlich in ein erkenntnistheoretisches Paradoxon hinein und dürfen daher bei solchen Bildern nicht stehen bleiben. Wir brauchen auch andere Erfahrungen von Atomen, um der Gefahr zu entgehen, die atomaren Bilder als natürliche zu begreifen. Wir brauchen die quantitative Messung. Nicht zu letzt wegen fehlender quantitativer Messungen erfreuen sich Fraktale und atomare Bilder postmoderner Beliebtheit.

Üblicherweise wird eine Messung mit einem Experiment gleichgesetzt. Dies ist zwar richtig, trifft aber wohl nicht das Wesentliche. Unter einem Experiment wird eine präparierte, künstliche Situation verstanden, d.h. der Ort an dem nach Bacon 'die Natur auf die Folterbank gespannt wird'. Andererseits eröffnet der Meßprozeß den praktischen Umgang mit Natur, der den Menschen als operationales Zentrum hat. Hier begegnen sich der sensationelle Erfolg und die ernüchternde Grenze der Naturwissenschaft. Denn wo etwas nicht mehr meßbar ist, hört scheinbar Physik als Wissenschaft auf. Dies gilt gleichermaßen für die großen Entfernungen im Universum, wie für die kleinsten Abstände der Elementarteilchen. Der Mensch selbst setzt den Maßstab, mit dem er messen kann. Daß Messungen nicht unbedingt etwas mit einem Experiment zu tun haben, wird deutlich, wenn man beachtet, wie sehr Messungen zum Bestandteil menschlichen Lebens gehören: Zeiten wurden auch schon lange vor dem Gebrauch von Uhren geschätzt und angegeben. Ebenso wurden Entfernungen, Volumina und Gewichte bestimmt und verglichen, schon lange bevor Waagen und Zentimetermaße die Genauigkeit erhöhten. Heutzutage benutzen wir Thermometer, Barometer, Tachometer, Wasserstandsanzeiger und diverse Waagen ohne uns darüber Gedanken zu machen und ohne es als Experiment zu bezeichnen.

Daß überhaupt etwas meßbar ist, ist für mich nicht selbstverständlich, sondern eher ein Wunder der Natur. Wieso gibt uns Natur auf unsere quantifizierenden Fragen überhaupt eine Antwort, wieso ist Naturwissenschaft quantitativ möglich? Auch für wohlbekannte physikalische Größen ist es nicht selbstverständlich, daß sie gemessen werden können. So dauerte es z.B. Jahrhunderte bis aus den anfänglichen systematisch wissenschaftlichen Bemühungen um die statische Aufladung bestimmter Materialien wie Bernstein, über die elektrischen Eigenschaften bei Tieren und dem Phänomen des Stromes sich der meßbare Begriff des elektrischen Feldes herauschälte. Ich möchte auch an das wohlbekannte Phänomen der Wärme erinnern und jeden bitten, sich einen Moment zu überlegen, wie er/sie sein subjektives Gefühl der Wärme oder Kälte wohl messen würde. Sicherlich fällt jedem sofort das Thermometer ein, jenes längliche Instrument auf dem sich eine Skala befindet, mit der man die sogenannte Temperatur ablesen kann. Aber was ist die Temperatur eigentlich für eine Größe? Was messen wir mit ihr? Und was hat sie mit unserem Gefühl der Wärme zu tun. Warum empfinden wir einen Metallöffel, den wir aus einer warmen Suppe gedankenlos in unseren Mund stecken als heiß, während wir die Suppe selber nur als warm bezeichnen würden - obwohl beide dieselbe Temperatur haben? Offensichtlich empfinden wir nicht nur die Temperatur als Wärme, sondern auch eine Größe, die wir Energie nennen wollen und mit einem Kalorimeter in der Einheit Joule oder in Kilowattstunden messen können. Ein solches Gerät hat nahezu jeder im Haushalt, und man ist auch bereit, gemäß den angezeigten Zahlen viel Geld dafür zu bezahlen. Aber was ist Energie eigentlich für eine Größe und was messen wir durch sie? Vielleicht Kraft oder Kreativität? Oder irgendeinen Stoff, der durch diese dünnen Leitungen kommt?

Ich hoffe, daß diese Beispiele verdeutlichen, daß meßbar und nicht-meßbar keine klare Unterscheidung von Größen erlaubt und daß man zwar schnell eine gemessene Zahl angeben kann, ohne aber zu wissen, was sie eigentlich bedeutet. Diese Bedeutung ist bei physikalischen Größen in der sogenannten **Einheit** verschlüsselt. Einheiten wie z.B. Sekunde, Meter, Joule und Kelvin sind die Qualitäten einer quantitativen Größe und verweisen auf Meßvorschriften, Begriffe und auch bildhafte Metaphern einer Größe. Etwas zu messen, ist nicht eine simple Reduktion auf eine Zahl, sondern entspricht einem Bedeutungsvergleich, der durch die Angabe der Einheit bei einer Größe implizit mitangesprochen wird.

Oft stellte sich in der Geschichte der Naturforschung heraus, daß verschiedene Einheiten, verschiedene Qualitäten, d.h. verschiedene Bilder, eigentlich ein und dasselbe bezeichnen. Daher erweist sich die Einheit der Physik nicht in einer einzigen Weltformel, sondern in der Einheit der Einheiten, in einem einheitlichen Bild der Welt. Das vielleicht prominenteste Beispiel dieser Vereinheitlichung von Einheiten ist die spezielle Relativitätstheorie. Ähnliche verwirrende Fragen wie zu Temperatur und Energie können auch bezüglich so wohlvertrauter Meßinstrumente wie Uhr und Zollstock gestellt werden. Die Leistung Einsteins bestand nicht in einer besonderen Rechenleistung oder einer besonders komplizierten Formel, sondern in dem Mut und der Phantasie, herkömmliche Bilder aufzugeben und ein neues Verständnis von Raum und Zeit, von Meter und Sekunde herbeizuführen. Da ich nicht über Relativitätstheorie sprechen möchte, lassen wir Raum und Zeit besser unbeachtet und wenden uns wieder Temperatur und Energie zu. Wir wollen nach Bedingungen von Messungen fragen und anhand der Temperatur eine Möglichkeit aufzeigen. Vor allem möchte ich hier auch ein konkretes Beispiel quantitativer, physikalischer Begriffsbildung geben, d.h. zeigen, wie Metaphern quantifiziert werden können.

## Temperatur, Entropie und Wärme

Betrachten wir zwei beliebige Körper, wobei ich unter Körper jede Art von Ansammlung einer Substanz verstehe, also auch Flüssigkeiten oder Gase. Wir wollen solche Körper in verschiede-



nen Zuständen betrachten, die sich z.B. durch Volumen, Druck oder Teilchenzahl unterscheiden, und bezeichnen diese Zustände mit  $Z_1, Z_2, \dots$ . Man kann sich z.B. eine Tasse mit heißem Tee ( $Z_1$ ) oder kalter Milch ( $Z_2$ ), sowie einen handwarmen Löffel ( $Z_3$ ) vorstellen. Es ist nun eine leidvolle Erfahrung, daß der Löffel, wenn man ihn in den heißen Tee tut, recht schnell selber heiß wird und auch solange heiß bleibt, wie es der Tee ist. Wir wollen dieses Phänomen das **thermodynamische Gleichgewicht** nennen und gebrauchen dabei die Metapher einer ausbalancierten Waage. D.h. zwei verschiedene Körper, die miteinander in Kontakt gebracht werden, gleichen sich im Laufe der Zeit aneinander an und verändern sich anschließend nur noch gemeinsam. Man kann sagen, daß sie in ein Gleichgewicht relaxiert sind, ähnlich einem Ball, der in einer Kuhle zur Ruhe kommt. Wir wollen daher sagen, daß der Tee  $Z_{tea}$  im thermodynamischen Gleichgewicht zum Löffel  $Z_{spoon}$  steht und drücken dies zur Vereinfachung symbolisch durch

$$Z_{tea} \sim Z_{spoon}$$

aus. Natürlich muß man bei diesem Bild des thermischen Gleichgewichts sogenannte Zeitskalen beachten. Man muß zumindest eine Weile warten, bis sich das Gleichgewicht eingestellt hat und man darf nicht solange warten bis sich beide Körper durch den Kontakt zu einem dritten in ein weiteres Gleichgewicht begeben. Dies könnte z.B. durch das umgebende Zimmer geschehen, in dem sich Löffel und Tee langsam abkühlen. Zum Glück lassen sich diese Zeitskalen meistens sehr gut trennen, was gerade durch das Experiment gewährleistet werden soll. Ändert sich der Zustand von Tee und Löffel während unserer Beobachtungszeit nicht wesentlich, wollen wir sie als 'thermisch isoliert' von der Umgebung bezeichnen.

In unserem Fall wollen wir aber gerade betrachten, was eigentlich passiert, wenn Tee und Löffel in einem Zimmer gemeinsam abkühlen. Nach einer gewissen Zeit steht dann nicht nur der Löffel zum Tee im thermischen Gleichgewicht, sondern auch das Zimmer zum Tee, d.h. wir können  $Z_{spoon} \sim Z_{tea}$  und  $Z_{tea} \sim Z_{room}$  schreiben. Und wie jeder schon erfahren hat, braucht man in diesem Moment auch keine Angst mehr zu haben, den Löffel anzufassen, denn wir wissen, daß auch der Löffel im thermischen Gleichgewicht zum Zimmer, d.h. zu uns selber steht, ausdrückbar durch  $Z_{spoon} \sim Z_{room}$ . Diese elementare Beobachtung erlaubt die Verwendung der Gleichgewichts-Metapher für thermische Phänomene und ist Inhalt des sogenannten 0.Hauptsatzes der Thermodynamik:

*Befindet sich ein Körper mit einem anderen im thermischen Gleichgewicht und dieser andere wiederum mit einem dritten Körper, so steht auch der erste Körper mit dem dritten im thermischen Gleichgewicht.* Formal kann man das vielleicht durch

$$Z_1 \sim Z_2 \quad \text{und} \quad Z_2 \sim Z_3 \quad \text{dann} \quad Z_1 \sim Z_3 \quad (1)$$

ausdrücken. Insbesondere gilt, daß ein Körper mit sich selber im thermischen Gleichgewicht steht, d.h.

$$Z_1 \sim Z_1 \quad . \quad (2)$$

Und man kann vor allem auch die Reihenfolge der Aussage umdrehen. D.h. befindet sich ein Körper mit einem anderen im thermischen Gleichgewicht, so steht natürlich dieser andere auch mit dem ersten Körper im Gleichgewicht. Formal kann dies durch

$$Z_1 \sim Z_2 \quad \text{dann} \quad Z_2 \sim Z_1 \quad (3)$$

ausgedrückt werden.

Dies scheinen recht triviale Aussagen zu sein, in der Tat haben wir aber eine wichtige mathematische Struktur der Gleichgewichts-Metapher herausgeschält. Die Nummer 0 hat dieser Satz deshalb bekommen, weil er zunächst in seiner Bedeutung übersehen wurde und in seiner

elementaren Beobachtbarkeit kaum der Rede wert schien. Er ist trotzdem die Grundlage der Thermodynamik, denn er erlaubt die Definition der Temperatur. Ich habe diesen Begriff bisher bewußt nicht benutzt, da er nicht nötig war. Dies mag künstlich erscheinen, da unsere Vorstellung vom thermodynamischen Gleichgewicht auch gleiche Temperaturen beinhaltet. Aber ich glaube, man bekommt erst dann einen richtigen Begriff von dem, was mit der Temperatur gemeint ist, wenn man sich verdeutlicht, daß sehr wohl die Metapher des thermodynamischen Gleichgewichts verwendet werden kann, ohne den quantitativen Begriff der Temperatur zu benutzen.

Die drei formalen Gleichungen (1) - (3) definieren eine sogenannte **Äquivalenzrelation**, d.h. zwei Zustände können als gleich oder äquivalent bezeichnet werden, wenn sie in einer Beziehung, d.h. einer Relation ' $\sim$ ', zueinander stehen, die diese drei Eigenschaften hat. In unserem Fall ist die Relation die des thermischen Gleichgewichtes, d.h. zwei Körper werden als äquivalent bezeichnet, wenn sie im thermischen Gleichgewicht sind. Selbstverständlich kann man Körper auch mit anderen Äquivalenzrelationen vergleichen, wie z.B. mit der Relation der Gleichzeitigkeit am gleichen Ort. Äquivalenzrelationen erlauben aber immer die Einteilung der Menge aller möglichen in Beziehung gesetzten Zustände von Körpern in Klassen gleicher oder äquivalenter Zustände. So gehören z.B. die Zustände des Löffels und des Tees zur gleichen Klasse, wenn sie im thermischen Gleichgewicht stehen. Sind sie nicht mit dem umgebenden Zimmer im Gleichgewicht, gehört der Zustand des Zimmers zu einer anderen Klasse. Ein Zustand  $Z$  kann nur zu einer einzigen solchen Klasse gehören und wir wollen diese Klasse mit  $\Theta(Z)$  bezeichnen.

Betrachten wir nun einen speziellen Körper, nämlich ein Glasröhrchen mit einer Flüssigkeit darin. Wir könnten auch irgendein anderes System nehmen, nur dieses ist außerordentlich praktisch. Dies liegt vor allem daran, daß man den Zustand des Systems ganz gut durch die Höhe der Flüssigkeitssäule beschreiben kann. Wir können zu diesem Zweck irgendwelche Striche an dem Glas anbringen und an jedem Strich irgendeine Zahl entsprechend einer Hausnummer. Es ist völlig egal wie und wo wir Striche und Zahlen anbringen. Allerdings sollten sie gut ablesbar sein und keine Zahl sollte doppelt vorkommen.

Jeder Zustand  $Z$  dieses Röhrchens gehört genau zu einer Klasse  $\Theta(Z)$  äquivalenter Zustände. Dieser Klasse ist nun durch unsere Striche eine Zahl zugeordnet worden, die wir **Temperatur** nennen wollen. D.h. eine bestimmte Temperatur gibt per Definition ein bestimmte Klasse von Zuständen an, die miteinander im thermischen Gleichgewicht stehen. Die Temperatur ist somit eine Konvention über die Bezeichnung äquivalenter Zustände. Wir messen an einem beliebigen Körper die Temperatur, indem wir unser Referenzsystem, das Glasröhrchen oder auch Thermometer genannt, in thermischen Kontakt bringen, etwas warten bis sich das thermische Gleichgewicht eingestellt hat und dann eine Zahl als Temperatur der Klasse dieser im Gleichgewicht stehender Körper ablesen. Damit nun jeder dieselbe Temperatur an demselben System mißt, sollte man sich noch einigen, welches Thermometer man benutzt und wie man die 'Hausnummern' verteilt. Dadurch haben wir eine objektive, meßbare Größe definiert, d.h. der Begriff der Temperatur bezeichnet genau dieses messende Konstruktionsverfahren und nichts anderes. Allerdings gewöhnt man es sich recht schnell an, von *der* Temperatur eines Körpers zu sprechen, als ob damit eine bestimmte Entität angesprochen wird. Der Begriff wird zur Eigenart, zum Wesen des Körpers. Jedem Zustand  $Z$  eines Körpers können wir daher die Temperatur  $T$  als Eigenschaft beifügen und in Zukunft  $Z(T)$  schreiben. Abschließend können wir sagen, daß zwei Systeme im thermischen Gleichgewicht die gleiche Temperatur haben, so daß diese beiden Begriffe eigentlich das Gleiche bedeuten. Doch in unserem Sprachgebrauch werden sie gänzlich unterschiedlich benutzt. Das thermische Gleichgewicht ist eine Metapher für die Beobachtung, daß zwei Körper im Kontakt sich annähern, ausbalancieren und dann im gleichen Zustand bleiben. Dagegen wird die Temperatur als objektive Größe einem Körper

als Eigenschaft zugeschrieben. Man übersieht dabei, daß es Körper gibt, die gar 'keine Temperatur haben', da sie nicht in ein thermisches Gleichgewicht mit anderen Körpern relaxieren. Ähnliches gilt für andere Eigenschaften von Körpern, wie z.B. für Farben. Nur liegen hier die Ursprünge der Begriffsbildung viel weiter zurück, so daß es schwer fällt, in der Farbe die quantitative Metapher einer Äquivalenzrelation, d.h. einer Klasseneinteilung zu sehen.

Wir haben mit der Metapher des Gleichgewichts immer auch den Begriff des 'Relaxieren' gebraucht und damit den ins Gleichgewicht strebenden Prozeß gemeint. Ich möchte daher einen weiteren Aspekt der Gleichgewichts-Metapher einführen, um etwas genauer zu betrachten, was passiert, wenn zwei Körper in thermischen Kontakt gebracht werden. D.h. ich möchte versuchen, quantitativ zu erfassen, was wir mit '**ins Gleichgewicht streben**' bildlich umschreiben. Intuitiv verstehen wir darunter den Vorgang, daß zwei Körper sich im Laufe der Zeit angleichen und nur unter Mühen wieder in den Ausgangszustand zurückgebracht werden können. Ist der Tee abgekühlt und im 'Gleichgewicht' mit dem Zimmer, müssen wir ihn wieder erwärmen, was wiederum Arbeit, Energie und nicht zuletzt Geld kostet.

Betrachten wir zunächst einen einzelnen Körper isoliert von der Umwelt und ohne thermischen Kontakt zu einem anderen Körper, so daß er nicht thermisch relaxieren kann. Obwohl der Körper thermisch isoliert ist, kann sein Zustand dennoch geändert werden. Ein Stück Metall (Löffel) kann magnetisiert, ein Gas (Luftdruck) komprimiert und eine Flüssigkeit (Tee) in ihrer Menge verringert werden. Obwohl die Körper thermisch isoliert sind, können sie bei diesen Zustandsänderungen sehr wohl ihre Temperatur ändern, d.h. in eine andere Klasse übergehen. Wir wollen annehmen, daß wir diese Zustandsänderungen langsam, man sagt quasistatisch, und vor allem reversibel, d.h. 'zurückführbar' durchführen. Diese Bedingungen sollen gewährleisten, daß der Körper trotz der Zustandsänderung immer im thermischen Gleichgewicht ist und nicht erst relaxieren muß. Die Bedingung der reversiblen Änderung ist besonders wichtig, da wir dadurch analog zum thermischen Gleichgewicht eine Äquivalenzrelation  $Z_1 < - > Z_2$  zwischen Zuständen einführen können. Wir wollen zwei Zustände eines Körpers als äquivalent bezeichnen, wenn sie thermisch isoliert reversibel ineinander überführt werden können. Offensichtlich sind die drei Bedingungen (1) - (3) einer Äquivalenzrelation erfüllt und wir können wieder Klassen ineinander überführbarer Zustände einführen. Jeder dieser Klassen wollen wir wie bei der Temperatur eine Zahl zuordnen und nennen sie **Entropie** mit dem Symbol  $S$ . Einem Zustand  $Z(T)$  mit Temperatur  $T$  können wir die Entropie  $S$  der zugehörigen Klasse zuordnen und schreiben  $Z(T, S)$ . Die Entropie  $S$  bezeichnet also Klassen reversibel ineinander überführbarer Zustände unter der Bedingung der thermischen Isolierung. Im Gegensatz zur Temperatur wollen wir noch keine Meßvorschrift angeben und  $S$  wirklich als 'Hausnummern' auffassen. Um zu verstehen, was die Entropie mit der Metapher des Gleichgewichts zu tun hat, heben wir nun die thermische Isolierung auf und betrachten zwei Körper im thermischen Kontakt, die zusammen allerdings gegen die Umgebung isoliert bleiben sollen. Die Ausgangszustände  $Z(T_1, S_1)$  und  $Z(T_2, S_2)$  der beiden Körper werden in einen gemeinsamen, anderen Zustand  $Z'(T', S')$  'relaxieren', den wir oben durch das thermische Gleichgewicht der beiden Körper charakterisiert haben. Offensichtlich erfolgt diese Zustandsänderung  $Z - > Z'$  **spontan** und ist auch nicht reversibel. Trennen wir nämlich diese Körper wieder, kehren sie nicht in ihren Ausgangszustand zurück, sondern bleiben im Zustand des herbeigeführten thermischen Gleichgewichtes  $Z'$ . Durch diese **Irreversibilität** ist die spontane Zustandsänderung  $Z - > Z'$  auch keine Äquivalenzrelation da die Gleichung (3) nicht erfüllt ist. Wir können mit ihr keine Klasseneinteilung vornehmen und auch keine quantitative Größe einführen. Trotzdem ist diese irreversible Zustandsänderung immens wichtig zum Verständnis der Entropie. Da die Relation (1) auch für irreversible Zustandsänderung  $Z - > Z'$  gültig bleibt, können wir die Entropien der Zustände so ordnen, daß sie anwachsen, wenn ein Zustand spontan bei

Aufhebung der Wärmeisolierung in einen anderen übergeht, d.h.

$$\Delta S = S - S' \geq 0 ,$$

wenn  $Z(S)$  nach  $Z'(S')$  relaxiert. Dies ist der Inhalt des 2.Hauptsatzes der Thermodynamik. Er besagt, daß die Entropie bei spontanen Prozessen anwächst. Genaugenommen ist dies wieder eine Konvention, da daß Anwachsen der Entropie nur die quantitative Form der Metapher des 'irreversiblen Strebens ins Gleichgewicht' ist. Sie wächst bei irreversiblen Prozessen an und bleibt bei reversiblen konstant. Man möchte gegen diese Herleitung einwenden, das der 2.Hauptsatz doch ein gefundenes Naturgesetz und nicht nur Definition der Entropie sei. Dies ist zwar richtig, nur muß man unterscheiden, was an diesem Satz Naturgesetz und was Definition ist. Naturgesetz ist die Existenz reversibler und irreversibler Prozesse und ihre dargelegten strukturellen Beziehungen untereinander. Daß diese durch eine Größe, Entropie genannt, ausgedrückt werden kann, ist zunächst nur Definition. Natürlich wird die Entropie durch Beziehungen zu anderen physikalischen Größen und Vorstellungen weiter festgelegt und in ihrer Bedeutung erweitert. Doch sie bleibt dabei stets ein quantitatives Maß für das 'Streben ins Gleichgewicht'.

Offensichtlich ist das spontane Relaxieren von Körpern in ein thermisches Gleichgewicht nicht unumkehrbar, da wir durch Arbeitsaufwand den Ausgangszustand wieder herstellen können. Aber eben nur mit Arbeitsaufwand, so daß Irreversibilität (Unumkehrbarkeit) nur ein Bild dafür ist, daß der Prozeß nur mit Mühen umzukehren ist. Die Entropie ist somit ein quantitatives Maß für die nötigen Mühen oder auch für die Verschwendung von Arbeit bei relaxierenden Prozessen. Wir müssen jetzt nur noch präzisieren, was und vor allem wieviel wir verschwenden.

Und damit komme ich zum Schluß zu einem Aspekt der Gleichgewichts-Metapher, der normalerweise am Anfang jeder Darstellung der Thermodynamik steht: der Vorstellung, daß 'etwas' zwischen den Körpern im thermischen Kontakt 'fließt'. Nehmen wir z.B. einen heißen Löffel und die eigenen Hand. Wir merken, daß unsere Hand wärmer wird und der Löffel sich dabei abkühlt. Beide Körper streben ins thermische Gleichgewicht zueinander und nehmen nach einer gewissen Zeit die gleiche Temperatur an. Während der Löffel sich in unserer Hand abkühlt, haben wir das Gefühl, daß 'etwas' vom Löffel auf unsere Hand übergeht, daß etwas fließt. Wärme nennen wir 'es' und merken, wie 'es' sich im Körper ausbreitet. Die Metapher eines fließenden Stoffes ist so suggestiv, daß man früher vom 'Caloricum' sprach, einem Stoff, der der Wärme entspricht und bei Kontakt mit dem Löffel von diesem auf unsere Hand übergeht, d.h. fließt. Das Problem dieser Metapher ist die Identifizierung dieses Stoffes und seine quantitative Messung, was sich schwieriger erwies als ursprünglich angenommen.

Nach dem bisher Gesagten, könnte man auf die Idee kommen, daß die Temperatur es ist, die fließt. Wenn zwei Körper nicht im Gleichgewicht sind, führt der eine seinen Überschuß an Temperatur dem anderen zu, bis beide die gleiche Temperatur haben. Nun kann man aber leicht nachprüfen, daß die Temperaturabnahme des einen nicht der Temperaturerhöhung des anderen entspricht. Die Gesamterhaltung dessen, was fließt, ist aber bei der Metapher eines Flußes implizit immer mitgedacht. Insofern entspricht die Temperatur nicht den Anforderungen des Bildes. Das Gleiche gilt für die Größe Entropie. Zwar nimmt beim thermischen Kontakt die Entropie des einen Körpers zu, des anderen ab, aber die Bilanzen sind nicht ausgewogen, denn insgesamt nimmt die Entropie bei irreversiblen Vorgängen gemäß des 2. Hauptsatzes zu. Diese Autonomie der Zahlen, d.h. die Unabhängigkeit der eingeführten Zahlen von den leitenden Bildern, erweist sich hier als eine entscheidender Eigenschaft einer quantitativen Metapher. Es gibt ein objektives Kriterium, ob Bilder zutreffen oder nicht. Offensichtlich ist die 'Fluß'-Metapher nicht auf Temperatur und Entropie anwendbar. Allerdings besteht bei quantitativen Größen die Möglichkeit andere Größen aus bestehenden zu definieren. So erweist sich z.B. die

Größe

$$U = \int T dS$$

bei dem beschriebenen Prozess als konstant, d.h. die Zunahme des einen Körpers entspricht der Abnahme beim Anderen

$$\Delta U_{zu} = \Delta U_{ab} \quad , \quad (4)$$

so daß  $U$  als dasjenige begriffen werden kann, was fließt. Wir nennen sie 'Wärme' und in einem allgemeineren Zusammenhang auch 'Energie'. Die Gleichung (4) ist der 1. Hauptsatz der Thermodynamik oder auch der **Satz von der Erhaltung der Energie**. Wärme und Energie sind in diesem Zusammenhang quantitative Metaphern für das beobachtete Fließen beim thermischen Kontakt zweier Körper. Wohlgermerkt haben wir keinen Stoff, d.h. kein 'Caloricum' identifiziert, der beim Kontakt anfängt zu fließen, sondern wir benutzen das Bild von fließendem Wasser, um die Ausbreitung und Erhaltung der Größe  $U$  zu bezeichnen. Da sich dieses Bild als so ertragreich erwiesen hat, ist die Energie mittlerweile selbst zu einer Entität geworden, die wie ein materialer Stoff betrachtet und sogar in der allgemeinen Relativitätstheorie nicht mehr von Materie unterschieden wird.

Ich hoffe, daß durch die eingeführten Größen Temperatur, Entropie und Wärme auch der Begriff der 'Thermodynamik' als einer Theorie des Gleichgewichtes, des Relaxierens und des Fließens von Wärme deutlicher geworden ist. Ich sollte erwähnen, daß die Metapher des Gleichgewichtes lange Zeit die Blickrichtung physikalischer Forschung bestimmte. Dabei wurde übersehen, daß die meisten Prozesse in der Natur nicht im thermischen Gleichgewicht ablaufen. Stichworte wie offene Systeme, nicht-lineare Dynamik, Chaos, Musterbildung deuten auf Prozesse fern von einem Gleichgewicht. Leider sind für solche Phänomene noch keine ähnlich tragfähigen quantitativen Metaphern wie Temperatur und Entropie gefunden worden. Trotz aller wichtigen Resultate in diesen Forschungsgebieten, stochern wir, scheint mir, im Brei und hoffen auf ein Körnchen.

Ich möchte nicht verschweigen, daß es andere Definitionen von Temperatur, Entropie oder Energie gibt und daß meine Darstellung nicht der historischen Entwicklung entspricht. Bilder sind vielfältig und ermöglichen zahlreiche Assoziationen, Verknüpfungen und Vorgehensweisen. Ein und dieselbe Größe kann daher in verschiedenen Zusammenhängen, verschiedenes bedeuten. So kann die Energie auch als quantitative Form des Bewegungspotentials eines Körpers betrachtet werden und spielt in der Theorie der Dynamik von Körpern eine entscheidende Rolle, lange bevor die Entropie als Größe eingeführt wurde. Die Bedeutung der Thermodynamik, sowie der Elektrodynamik für die Theorien des 20. Jahrhunderts liegt vor allem in der Art und Weise wie Grundbegriffe und Grundgesetze eingeführt wurden. Hier wurde auf konstruktive Weise vorgeführt, wie physikalische Größen (Felder, Temperatur, Entropie und Wärme) , die nicht unmittelbar gegebenen Sinneseindrücke entsprechen, definiert und miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Mit der Thermodynamik und der Elektrodynamik etabliert sich der Begriff der physikalischen Größe, der in der Quantenmechanik zu Metaphern wie Quantenfeld und Quarkfarben führt.

## Zusammenfassung

In Abschnitt I wurde das physikalische Modell als ein **System von Axiomen**, von Grundbegriffe und Grundgesetzen vorgestellt, aus dem durch **Deduktion** Gesetzmäßigkeiten und physikalische Aussagen über die Natur gezogen werden können. Diese können dann **im Experiment überprüft** und dadurch das Modell falsifiziert werden.

Unberücksichtigt blieb bei dieser Darstellung der Entstehungszusammenhang der Grundbegriffe und Grundgesetze eines Modells. Wir haben daher in den Abschnitten II und III versucht, die wichtigsten physikalischen Größen einer Theorie als **quantitative Metaphern** zu fassen, die einerseits bildhaft die Phänomene beschreiben, andererseits aber auch quantitativ faßbar sind. Insbesondere haben wir zwei wichtige Möglichkeiten der Quantifizierung dargestellt: die Visualisierung der Metapher des elektromagnetischen Feldes durch Kraftlinien, die gezählt werden können, sowie die Einführung einer Äquivalenzrelation und die Konstruktion eines Thermometers als Referenzsystems für die Metapher des thermischen Gleichgewichtes.

Aufgrund des quantitativen Charakters der physikalischen Größen ist ein Vergleich verschiedener Metaphern direkt in Form **physikalischer Gesetze** möglich, da an einem Objekt verschiedenes gemessen werden kann; die Temperatur einer Flüssigkeit, das Volumen, der Druck, etc. Die so entstehenden quantitativen Relationen werden physikalische Gesetze genannt und gelten als der Inbegriff physikalischer Forschung. Abschließend ein schon erwähntes Beispiel: Nachdem das Magnetfeld als quantitative Metapher eingeführt ist, können dessen Kraftlinien durch Eisenspäne dargestellt und dadurch gezählt, bzw. gemessen werden. Bringt man nun eine Drahtspule in dieses Magnetfeld, so kann in der Spule eine Spannung  $U$  gemessen werden, die proportional zu der Anzahl der Kraftlinien ist. Diese Induktion ist von fundamentaler Bedeutung für die Theorie der Elektrodynamik, sowie der Elektrotechnik. Trotzdem wurde sie erst von Faraday gefunden, nachdem er sein Konzept der Kraftlinie entwickelt hatte. Das Entscheidende war die Schaffung der Metapher eines Feldes von Linien, um magnetische Erscheinungen zu beschreiben.