

MYTHOS UND ROMANTIK IN DER PHYSIK

Hans U. Fuchs

Abteilung Mathematik und Physik, Departement T

Zürcher Hochschule Winterthur, 2004

Abstract und Leitfaden	2
1 Einführung	5
1.1 Die Physik als Systemwissenschaft (PSS)	
1.2 Hypothese: Mythisches und romantisches Denken in der Physik	
1.3 Übersicht über den Aufsatz	
2 Vom Mythos zum Modell: Metaphern und Analogien	6
2.1 Was sind Metaphern und Analogien?	
2.2 Typen und Aspekte von Metaphern	
2.3 Verursachen, machen, erzeugen: Kausalität und Prozesse	
2.4 Visuelle Metaphern	
3 Höhen und Tiefen: Antrieb und physikalische Prozesse	11
3.1 Wasserfälle und kommunizierende Gefässe	
3.2 Niveaus und Spannungen als Antriebe von Vorgängen	
3.3 Prozess-Diagramme	
3.4 Bei Prozessen wird Wärme produziert	
4 Substanzen und Fluide: Mengen und Bilanzen	18
4.1 Die Elemente in verschiedenen Kulturen	
4.2 Mengengrössen und Bilanzen	
4.3 Systemdynamische Diagramme	
5 Wandlung und Beständigkeit: Die Rolle der Energie	21
5.1 Ketten von Vorgängen: Zusammenhänge, Wandel und Konstanz	
5.2 Treibende und angetriebene Prozesse	
5.3 Energietransporte und Energiespeicher	
6 Die metaphorische Struktur von PSS	25
6.1 Räumliche Metaphern: Drücke, Temperaturen, Spannungen	
6.2 Ontologische Metaphern: Stoffe, Wärme, Elektrizität, Drall und Schwung	
6.3 Stoffe, Wärme, Elektrizität, Drall und Schwung als Agenten: Die Rolle der Energie	
6.4 Die Metapher des Wasserfalls	
6.5 Analogien in PSS	
7 Zusammenfassung und Ausblick	30
Anmerkungen	32
Literaturverzeichnis	32
Anhang	35
A.1 Dissipative Prozesse reibungsfreie Bewegung	
A.2 Physik, Systemwissenschaften und Romantik	
A.3 Beispiele von Metaphern und metaphorischen Strukturen	

Abstract und Leitfaden

Wir verstehen Physik als typische Vertreterin von Wissenschaften, die mit formalen Begriffen beginnen und enden. Verständnis ergibt sich nur durch einen möglichst hohen Grad an Formalisierung. Dass das Fundament eines guten und kreativen Verständnisses aber scheinbar “unwissenschaftlich” ist, scheint man zu vergessen. In diesem Aufsatz soll gezeigt werden, dass die Wurzeln in mythischem und romantischem Denken gefunden werden, und dass Metaphern und darauf beruhende Analogien zu einem intuitiven aber sehr tragfähigen Verständnis alltäglicher physikalischer Prozesse führen.

Damit wir vor der Einführung einer bildhaften metaphorischen Physik schon etwas für Metaphern sensibilisiert werden, diskutiert Abschnitt 2 Bedeutung und Beispiele von Metaphern und versucht, den Unterschied zwischen Metaphern und Analogien herauszuarbeiten. Die wichtigste These dieses Teils besagt, dass unsere Erfahrungen metaphorisch strukturiert sind, und dass wir deshalb ruhig und bewusst auf Metaphern aufbauen können (müssen).

In den folgenden drei Abschnitten wird Physik als Systemwissenschaft dargestellt. Die Beschreibung ist bildhaft und macht von Metaphern Gebrauch, ohne direkt davon zu sprechen. Die metaphorische Struktur dieser Darstellung der Physik wird dann in Abschnitt 6 untersucht.

Die Physik als Systemwissenschaft macht mindestens von drei Strukturen oder Gruppen von Ideen Gebrauch. Die erste Vorstellung ist die von sogenannten *Niveaugrößen* (Abschnitt 3). Wir stellen uns Wasserniveaus, Druck, elektrische Spannung, Temperatur und Geschwindigkeit als Niveaugrößen vor. Unterschiede dieser Größen werden als “Spannungen”, als *Antriebe* für Fließprozesse interpretiert. Dieses Bild hat viel mit der mythischen Vorstellung von Polaritäten und der Vermittlung zwischen den Extremen (den Polen) zu tun. Wir sagen, Wasser fliesse von einem Gefäß, in dem das Niveau höher ist, in eines, in dem es niedriger ist, weil die Natur versuche, die Niveaus einander anzugleichen.

Die alltägliche *Substanzvorstellung*, die eine weitere Wurzel metaphorischer Strukturen bildet, wird auf die Größen übertragen, von denen wir sagen, dass sie in Prozessen fließen: Wasser, Luft, Elektrizität, Wärme, Bewegungsmenge (Abschnitt 4). Wir gehen mit diesen Größen also wie mit einer typischen *Mengengröße* um. Sie können fließen und gespeichert werden, vielleicht kann man sie erzeugen. Auf jeden Fall bilanzieren wir sie. Zwischen den Niveau- und Mengengrößen gibt es Beziehungen, die zu speziellen Gesetzen führen (z.B. Stromcharakteristik für den Zusammenhang zwischen Strom und Niveaudifferenz, kapazitive Charakteristik für den Zusammenhang zwischen gespeicherter Menge und ihrem Niveau).

Wenn man Vorgänge mit diesen Begriffen und Bildern (die Wasserfall-Metapher ist dabei vielleicht die wichtigste) versteht, so bleibt eine Frage offen: wie koppeln Vorgänge zu ganzen Prozessketten aneinander? Eine romantische Vorstellung einer Größe, die Zusammenhänge über alles hinweg herstellt, die unverändert durch die Wandlungen der Natur geht, führt auf eine Lösung. Die Idee, die im Zeitalter der Romantik Fuss fasste, ist das Energieprinzip (Abschnitt 5). *Energie* vermittelt zwischen Prozessen (diese Vermittlung hat mit unseren Vorstellungen von Kausalität zu tun; Abschnitt 2.3) und läuft unverändert durch Prozessketten hindurch.

Der Aufsatz bildet eine Grundlage für eine Einführung in die Thermodynamik. Eines der Ziele ist ein fundiertes qualitatives Verständnis des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Diese Darstellung der Physik bildet das Fundament für ein Beispiel der Evolution physikalischer Strukturen, nämlich Sternentwicklung. Diese Themen werden in weiteren Aufsätzen behandelt.

Leitfaden

1. Lesen Sie diesen Aufsatz, um einen Überblick über die darin dargestellten Ideen zu erarbeiten. Insbesondere sollten Sie die Bedeutung von Metaphern und den Unterschied zu Analogien verstehen. Versuchen Sie, mit Hilfe der Bilder aus den Abschnitten 3-5 ein intuitives Verständnis für physikalische Prozesse aufzubauen.
2. **Fragen:** Lassen Sie sich von den folgenden Fragen bei der Auseinandersetzung mit dem Thema leiten. Versuchen Sie, einige zu bearbeiten.
 - Was sind Metaphern und Analogien? (Abschnitt 2)
 - In *Kritik der Urteilskraft*, Paragraph 59, schrieb Kant unter dem Titel *Symbol*: “Übertragung der Reflexion über einen Gegenstand der Anschauung auf einen ganz anderen Begriff, dem vielleicht nie eine Anschauung direkt korrespondieren kann”. Vergleichen Sie diese Aussage mit der Beschreibung der Bedeutung von Metaphern von Lakoff und Johnson (1980). Siehe Abschnitt 2.1. Kann man Kants *Symbol* und den Begriff *Metapher* vergleichen?
 - Schauen Sie sich den Vergleich von metaphor, analogy und simile im Internet an. Metapher, Analogie und Vergleich werden alle als Vergleiche bezeichnet. Worin besteht dann der Unterschied? (Abschnitt 2.1)
http://www.longman.com/ae/azar/grammar_ex/message_board/archive/articles/00357.html
 - Welche Niveaubegriffe gehören zu thermischen, hydraulischen, elektrischen und mechanischen Vorgängen? (Abschnitt 3)
 - Wenn man sagt, das Paar warm-kalt sei ein typisches Beispiel einer mythischen Polarität, und wenn man dann darauf eine Metapher für die Temperatur aufbaut (was ist dann diese Metapher?), welche intuitiven Konsequenzen für Ihr Verständnis von thermischen Prozessen würden Sie daraus ziehen? (Mit anderen Worten: Hat die Metapher für Sie eine ordnende und kreative Bedeutung, mit der Sie die Welt der Wärme verstehen?)
 - Stimmt die Analogie zwischen Elektrizität und Wärme in Bezug auf elektrische Ströme durch Drähte oder Wärmeströme durch Wände? (Abschnitt 3)
 - Welches sind die zu thermischen, hydraulischen, elektrischen und mechanischen Vorgängen gehörenden Mengengrößen? (Abschnitt 4)
 - Suchen Sie zu den Niveau- und Mengengrößen die Einheiten, die man in der Physik verwendet.
 - Kann man die vier Elemente aus der Antike (Erde, Wasser, Luft und Feuer) mit den chemischen Elementen vergleichen, oder eher mit den Mengengrößen aus PSS?
 - Erklären Sie die Rolle der Energie im Wasserfallbild. Erklären Sie die Rolle der Energie bei einer elektrisch angetriebenen Wasserpumpe. (Abschnitt 5)
 - Versuchen Sie, Prozessdiagramme für folgende Geräte oder Prozesse zu skizzieren: Photosynthese, Wasserturbine, elektrische Heizung, Brennstoffzelle. Versuchen Sie dabei immer, das Diagramm auch in Worten zu beschreiben (Abschnitt 5).
 - Geben Sie, und zeichnen Sie (mit Hilfe von Prozessdiagrammen) ein Beispiel für eine Prozesskette aus Natur oder Technik. (Abschnitt 5)
 - Betrachten Sie einige der Diagramme, die im Text zur Physik vorkommen, zum Bei-

spiel den Wasserfall, ein Prozessdiagramm oder ein Stella-Diagramm. Sind das visuelle Metaphern? Oder sind das nur graphische Repräsentanten für Metaphern und Gedanken, die wir in unserer Kultur viel eher (und vielleicht auch besser) mit Worten ausdrücken würden? (Abschnitt 2.4, Abschnitte 3-5)

- Zeigen Sie die metaphorische Struktur von PSS auf. Was sind die räumlichen und ontologischen Metaphern? Gibt es strukturelle Metaphern? Welche Aussagen sind Analogien? (Abschnitt 6)
 - Ist der folgende Vergleich eine Analogie, Metapher oder ein Gleichnis? Wir wissen, dass Wärme entsteht, wenn Wasser durch einen Schlauch fließt. Wir wissen aus direkter Erfahrung, dass auch dann Wärme produziert wird, wenn Elektrizität fließt, oder wenn Drall von einem rotierenden Rad durch die bremsende Hand abfließt. Aber was ist, wenn Wärme durch eine Hauswand fließt?
 - Ist die Aussage von Lakoff und Johnson (1980), dass Metaphern auf Korrelationen und nicht auf Ähnlichkeiten beruhen (Abschnitt 2.1), auf die Metaphern der PSS anwendbar?
 - Gibt es eine metaphorische Basis für Vorstellungen darüber, dass bei allen Prozessen in der Natur immer Wärme produziert wird?
3. **Aufgabe 1:** Untersuchen Sie, inwieweit sich die für PSS benutzte Darstellung physikalischer Vorgänge und Zusammenhänge für die Konstruktion von Metaphern für alltägliche (z.B. psychologische) Vorgänge nutzen lässt. Suchen oder konstruieren Sie Beispiele für solche Metaphern. (Beispiel aus der englischen Sprache: Her anger rose until she boiled over.) Benutzen Sie die in Abschnitt 2 dargestellte Klassifikation (einschließlich der Frage, ob es sich um sprachliche oder visuelle Metaphern handelt). Erklären Sie, wie gut (oder schlecht) sich PSS für Ihren Zweck nutzen lässt.
 4. **Aufgabe 2:** Untersuchen Sie (z.B. bei einigen Ihrer Kolleginnen und Kollegen durch gezielte Befragung), ob unser Alltagsverständnis von Bewegung der Darstellung in PSS entspricht. Als Gegenpol untersuchen Sie, wie weit die von Galilei konstruierte und dann von Newton benutzte Idee der Trägheitsbewegung (eine Bewegung hört nie auf, wenn keine Kräfte auf den sich bewegenden Körper wirken; siehe Anhang) in uns verankert ist.
 5. **Aufgabe 3:** Ist Romantik anti-naturwissenschaftlich? Anti-rational? Ist die der Feind der Naturwissenschaften? Oder profitieren die Wissenschaften von ihr? Gibt es klare Spuren, oder sogar Fundamente, die auf die Romantik zurück gehen? (Aus diesem Thema können Sie leicht eine Semesterarbeit machen. Untersuchen Sie dabei auch den Zusammenhang zwischen Romantik und Systemwissenschaft.)

1 Einführung

Dieser zweite Aufsatz aus einer Reihe, die sich dem Thema der Evolution physikalischer Strukturen widmet, gibt eine Darstellung der Physik, die stark auf Metaphern aus mythischem und romantischem Denken aufbaut. Wegen ihrer Bedeutung wird die Theorie von Metaphern diskutiert, die metaphorische Struktur der hier verwendeten Darstellung der Physik untersucht, und die Bedeutung von Analogien hervorgehoben.

1.1 Die Physik als Systemwissenschaft (PSS)

Seit etwa 50 Jahren wird weltweit eine bestimmte Form der Darstellung physikalischer Vorgänge für den einführenden Physikunterricht an Universitäten benutzt, die ich *traditionelle Physik* (TP) nennen werde (Halliday, Resnick, Walker, 2003)¹. Dieser Unterricht dient auch als Modell für die Sekundarstufe. Sie werden hier nun eine Darstellung kennen lernen, die sich in bestimmter Hinsicht von TP unterscheidet. Ich werde diese Darstellung *Physik als Systemwissenschaft* (PSS, *Physics as a Systems Science*; Fuchs, Ecoffey und Schütz, 2003)² nennen.

Auf der Ebene der formalen Modelle müssen TP und PSS die selben Resultate liefern (abgesehen von Gebieten, die in der einen, aber nicht in der anderen Darstellung behandelt werden³). Der Unterschied zwischen den beiden Darstellungsarten muss also auf einer anderen Ebene liegen. Ich werde in diesem Aufsatz die These vertreten, dass sich TP und PSS hauptsächlich in den grundlegenden *Metaphern* unterscheiden, auf denen dann die formalen Begriffe aufgebaut werden. Ich bin der Meinung, dass die Metaphern von PSS sehr direkt auf die in unserem mythischen (und teilweise romantischen) Denken verankerten Strukturen abstützen.

Kurz gesagt baut PSS auf den Metaphern von Niveaus und Niveauunterschieden (Polaritäten: Spannungen), Mengen, Fluiden und Flüssen (Substanzen, Entitäten), und den Mengen als Agenten von Prozessen auf. Dazu kommt die romantische Metapher des alles Verbindenden, dessen, was durch die Ketten von Vorgängen und Veränderungen unverändert hindurchgeht (*vis viva*, die lebendige Kraft: Energie). Die Beispiele, die zur Einführung von PSS benutzt werden, stammen von Vorgängen, die reibungsbehaftet sind und bei denen Wärme produziert wird. Die verschiedenen Prozesse stehen gleichberechtigt neben einander, sie benutzen die gleichen Metaphern, und damit lässt sich ein Gebiet in Analogie zu einem andern lernen und verstehen.

Natürlich benutzt auch TP diese Metaphern, zumindest zu einem bestimmten Grad. Aber erstens wird das kaum bewusst gemacht, zweitens wehrt man sich in vielen Fällen sogar dagegen (man meint, die Metaphern führten direkt zu Fehlvorstellungen⁴), und drittens—und das ist vielleicht der wichtigste Unterschied—baut die Darstellung in TP auf einer Vorstellung auf, die die Reibung beim Verständnis von Bewegung verbannen will. Die Physik der reibungslosen Bewegungen wird dann geradezu als die grundlegende Theorie betrachtet, mit der alle anderen Erscheinungen auch erklärt werden können. Die reibungsfreie Bewegung wird zur eigentlichen Metapher von TP. Andere Prozesse—thermische, elektrische, usw.—stehen also nicht auf der selben Ebene wie Bewegung. Analogien lassen sich schwerer aufbauen und nutzen.

Ich muss noch erklären, was *Systemwissenschaft* in PSS bedeutet (International Society of the Systems Sciences; Weber, 2004; Fuchs, 2002). Die Systemwissenschaft studiert die Zusammenarbeiten von Teilen eines grösseren oder komplexeren Ganzen (System). Die Betonung liegt also auf der Dynamik eines ganzen Systems, und etwas weniger auf den “mechanischen” Einzelheiten seiner Teile. Da die Metaphern von PSS auch die sind, die sich zur Formulierung einer Systemwissenschaft eignen, ist der Zusammenhang zwischen PSS und Systemwissenschaft offensichtlich.

1.2 Hypothese: Mythisches und romantisches Denken in der Physik

Unser Verstehen wurzelt in ursprünglichen Verstehensformen wie Mythos und Romantik (siehe Fuchs, 2004). Deshalb erstaunt es nicht, dass eine Wissenschaft wie Physik auch auf solchen Verstehensformen aufbaut. Wir müssen uns nur umschauen und die benutzten Begriffe bewusst betrachten. In der Biologie und Ökologie sprechen wir von Nahrungskette, Energiehaushalt, Biomasse, osmotischem Gefälle, Entschlüsselung von Erbgut, ökologischer Nische (Caviola, 2003, p.42). Die meisten Beteiligten würden wohl zustimmen, wenn man sagt, dass Metaphern eine Bedeutung für die Physik haben. Allerdings wird diese Bedeutung als eher klein und in vielen Fällen störend und schädlich angesehen.⁴

Hier möchte ich wesentlich weiter gehen und untersuchen, inwiefern Metaphern basierend auf ursprünglichen Verstehensformen nicht nur existieren, sondern ein tragfähiges Fundament für das Verständnis physikalischer Prozesse bilden. Mythos und Romantik sind nicht welke Blätter am Stamm der rationalen Wissenschaften, sie sind ihre eigentlichen Wurzeln. Ich habe im ersten Aufsatz aus dieser Reihe deutlich gemacht, wie verschiedene Formen des Denkens zusammenkommen müssen, um ein vollständiges Gebäude zu bilden (Fuchs, 2004). Hier werde ich diese Hypothese durch die Untersuchung der metaphorischen Struktur von PSS konkretisieren (Abschnitt 6).

1.3 Übersicht über den Aufsatz

In Abschnitt 2 wird gezeigt, dass Metaphern und Analogien die Werkzeuge sind, mit denen wir von mythischen Denkschemas zu formalen Modellen kommen können. Die Bedeutung und Form von Metaphern und Analogien wird dargelegt.

Die drei folgenden Abschnitte dienen dazu, drei wesentliche Aspekte der Physik als Systemwissenschaft darzulegen. In Abschnitt 3 geht es hauptsächlich darum, einige einfache Prozesse aus verschiedenen Phänomenbereichen kennenzulernen und zu sehen, dass bei allen Niveaus und Niveaudifferenzen vorkommen. Die Niveaudifferenzen spielen die Rolle von Antrieben für die Prozesse. Aus diesen Betrachtungen entsteht ein Wasserfallbild physikalischer Prozesse. Zudem wird klar, dass die Produktion von Wärme eine normale Begleiterscheinung aller Phänomene ist. Die Diskussion in Abschnitt 4 verdeutlicht, dass die Prozesse im Speichern, Fließen, Entstehen und Vergehen von Mengen bestehen. Der Umgang mit diesen Größen führt uns zu Bilanzgesetzen. Schliesslich wenden wir uns der Frage zu, wie Prozesse zusammenhängen und zu Ketten von Vorgängen führen. Um dieses Phänomen zu verstehen, führen wir den Begriff Energie ein (Abschnitt 5).

Die Diskussion von Metaphern und die Darstellung der Physik erlaubten uns zu erkennen, inwiefern PSS eine metaphorische und analogische Struktur aufweist, und worin diese Struktur besteht (Abschnitt 6). Eine kurze Zusammenfassung in Abschnitt 7 beschliesst den Aufsatz.

2 Vom Mythos zum Modell: Metaphern und Analogien

Im Vierer-Zyklus ist das mythische Denken die Quelle von Ideen für formal symbolische Modelle (Fuchs, 2004). Was sind die Formen des mythischen Verstehens? Gibt es konkrete Schritte, die von mythischen Vorstellungen zu Modellen führen? Metaphern und darauf aufbauende Analogien sind die nützlichsten Werkzeuge auf diesem Weg. In diesem Abschnitt sollen Metaphern, Analogien und metaphorische Strukturen kurz dargestellt werden. Die wichtigste ver-

wendete Quelle zum Thema Metaphern ist das Buch *Metaphors We Live By* von Lakoff und Johnson (1980).⁵

2.1 Was sind Metaphern und Analogien?

Durch Metaphern und Analogien wird ein Begriff durch einen andere Begriff beschrieben oder erklärt. Die Art der Beziehung zwischen den beiden Begriffen ist bei Metaphern und Analogien verschieden. Trotzdem fällt es nicht immer leicht zu sagen, ob wir nun eine Metapher oder eine Analogie vor uns haben. Zudem verwenden verschiedene Autoren die Begriffe nicht immer genau gleich. Ich mache den Versuch einer Definition von Metapher und Analogie, die die wichtigsten Punkte aufgreift und gleichzeitig auf unsere Anwendung in der Physik passt. Dabei soll neben *Metapher* und *Analogie* der Begriff *Vergleich* oder *Gleichnis* einbezogen werden.

Etwas vereinfacht kann man sagen, dass in allen drei Fällen, d.h. bei Metapher, Analogie und Gleichnis, Kenntnisse von einem Objekt auf ein neues Objekt oder einen neuen Begriff übertragen werden. Bei Metapher braucht man für den Vergleich das Wort *ist*, bei Analogie *so als ob*, und bei Vergleich *ist wie*. *Gedanken sind Nahrung* wäre demnach eine Metapher. *Der Wein geht runter, als ob es Wasser wäre* ist eine Analogie. *Der Kleine ist wie ein Engel* ist ein Vergleich.

Metapher. Die Metapher ist die wichtigste Form des Vergleichs, obgleich man das in vielen Fällen nicht sofort sieht: mit ihr wird Neues erschaffen, mit ihr lernen wir zu verstehen. *Gedanken sind Nahrung* scheint keine direkte und besonders klare Aussage oder Definition zu sein. Trotzdem, oder gerade deswegen, geschieht hier etwas ganz Fundamentales: Man überträgt etwas, was man sehr direkt, deutlich und gut aus dem täglichen Leben kennt (*Nahrung*), wofür es keine Erklärung braucht,⁶ auf einen weniger klaren, abstrakteren Begriff (*Gedanken*). Auf sehr intuitive Weise wird damit klar, was ein Gedanke ist. Ausdrücke wie *diesen Gedanken muss ich erst verdauen*, *er hat die Idee gut aufgenommen*, *sie dürstet nach neuen Gedanken* zeigen, dass eine Metapher eine ganze Welt des Verstehens öffnet. Natürlich erklärt eine Metapher immer nur einen Aspekt des Neuen, den aber um so besser. Metaphern erklären, sie sind das Vehikel für unsere Begriffsgebäude, sie zeigen sogar auf, wonach wir unser Leben ausrichten (*Metaphors We Live By* von Lakoff und Johnson, 1980; siehe das Beispiel *time is money*).

Analogie. Analogien schaffen eine präzisere Abbildung zwischen Elementen zweier Begriffe oder Konzepte (*structure mapping*; Gentner, 1983; Gentner and Markman, 1997; Gentner et al., 2001). Mit *Dieser Wein geht runter wie Wasser* zieht man einen Vergleich zwischen bestimmten Eigenschaften von Wein und Wasser. Kennt man die besagten Eigenschaften von Wasser, so kennt man sie auch von Wein. Zudem lässt eine Analogie vermuten, dass noch weitere Beziehungen zwischen Wein und Wasser bestehen könnten, die mit dem ursprünglichen Vergleich nicht angesprochen wurden (Wasser kann verdampfen, vielleicht kann das Wein auch). In unserem Beispiel wird von Wasser auf Wein geschlossen, aber der Vergleich der Eigenschaften liesse sich auch umkehren (wenn wir wissen, wie sich Wein in bestimmter Hinsicht verhält, so wissen wir das auch über Wasser). Diese Umkehrung geht bei einer Metapher nicht (wir sagen nicht *Nahrung sind Gedanken*).

Vergleich und Gleichnis. Ein Vergleich (*Gleichnis*) ist im einfachsten und direktesten Sinne des Wortes ein Vergleich. Es tun sich damit keine neuen konzeptuellen Welten auf wie bei einer Metapher, und um eine Analogie, die sich umkehren liesse, und aus der neue Schlüsse gezogen werden können, handelt es sich auch nicht.

Korrelation und Ähnlichkeit. Ein Aspekt, der für Lakoff und Johnson (1980) wichtig ist, kann

den Unterschied zwischen Analogien und Metaphern zusätzlich verdeutlichen. Der Vergleich, der Analogien zu Grunde liegt, macht klar von Ähnlichkeiten Gebrauch. Unsere Erfahrung zeigt Ähnlichkeiten zwischen Wasser und Wein auf. Auf der anderen Seite benutzen Metaphern nicht Ähnlichkeiten, sie produzieren sie. Metaphern beruhen vielmehr auf Korrelationen, die wir wahrnehmen. Erst durch eine Metapher sehen wir eine Ähnlichkeit zwischen den beiden Begriffen, die sie verbindet. Wir erfahren zum Beispiel, dass bei der Erschaffung eines Produktes eine Beziehung zwischen dem Aufwand an Zeit und demjenigen für Arbeit besteht. Deshalb sagen wir, *Zeit ist eine Ressource* und *Arbeit ist eine Ressource*. Durch diese Metaphern sehen wir dann eine Ähnlichkeit zwischen Zeit und Arbeit, die andernfalls nicht bestehen würde (Lakoff and Johnson, 1980, pp. 151-152). Das würde bedeuten, dass Analogien auf den durch Metaphern konstruierten Ähnlichkeiten aufbauen.

Zusammenfassend kann man über Metaphern sagen, dass sie—immer teilweise—eine Erfahrung durch eine andere strukturieren. So erschaffen wir uns konzeptuelle Strukturen, d.h. Verständnis der Welt um uns herum.

2.2 Typen und Aspekte von Metaphern

Es gibt Metaphern, die ganz verschiedener Natur sind. Für uns sind ein paar wenige Klassen von Metaphern wichtig: sogenannte orientierende (oder räumliche) Metaphern, ontologische (oder substantive) Metaphern, und strukturelle Metaphern (siehe Lakoff und Johnson, 1980).

Orientierende oder räumliche Metaphern. Dass grundlegende Metaphern direkt aus unserem Leben zu stammen scheinen, zeigen zum Beispiel die orientierenden oder räumlichen Metaphern, die auf den Konzepten *oben und unten* (*hoch und tief*), *vorne und hinten*, *innen und aussen* beruhen. *Meine Stimmung steigt* ist ein Beispiel für die Metapher *oben ist gut*. (Wieso sollte Stimmung etwas sein, das—räumlich gesprochen—nach oben gehen sollte, oder wieso sollte oben gut sein? Auf eine fundamentale Art denken wir einfach so.) So verwenden wir die aus unseren Erfahrungen bekannten und nicht erklärungsbedürftigen Konzepte der Orientierung im Raum als Basis für das Verstehen abstrakter Begriffe wie *Stimmung*. Das Beispiel zeigt deutlich, dass es sich bei Metaphern um Übertragungen handelt. Zudem verdeutlichen räumliche Metaphern, dass der menschliche Körper als Quelle vieler Erfahrungen genutzt wird. Die Bedeutung von *oben und unten* ist für uns aufrecht stehenden Lebewesen fundamental.

Ontologische Metaphern. Unsere direktesten Alltagserfahrungen erstrecken sich sicher auch auf Objekte, Substanzen, Entitäten. Die Metapher *Liebe ist eine Substanz* zeigt sich zum Beispiel an Aussagen wie *Sie steckt voll Liebe* oder *Er hat ihr viel Liebe gegeben*. Metaphern, die auf der Erfahrung der materiellen Welt beruhen, nennt man ontologische Metaphern. Sie lassen sich übrigens erweitern, mit sich selber und anderen kombinieren. So verwenden wir offensichtlich die Metapher *ein Rennen ist ein Behälter* wenn wir sagen dass wir *mitten im Rennen* stecken. Zusammen mit den Konzepten der Orientierung (*innen und aussen*) ergibt sich aus dem Konzept *Objekt* zum Beispiel das Konzept *Behälter*.

Strukturelle Metaphern. Strukturelle Metaphern sind komplexer in dem Sinne, dass ganze Erfahrungswelten⁶ auf neue Begriffe übertragen werden. Ausdrücke wie *Ich muss mein Argument verteidigen*, oder *Er hat mein Argument zerstört* zeigen, dass wir über *Argumente als Krieg* denken (Lakoff und Johnson, 1980). In der menschlichen Erfahrung ist Krieg ein bekanntes, stark verankertes und komplexes Konzept, das auf einen neuen Erfahrungsbereich übertragen wird.

Lebendige und tote Metaphern. Es gibt Metaphern, die so oft benutzt werden, dass sie in unse-

rem Bewusstsein zu normalen Ausdrücken werden, wie man sie in Wörterbüchern findet. Beispiele sind Kopfsalat, Fingernagel, Tischbein und viele andere. Man bezeichnet diese als tot. Diese Ausdrücke bewahren aber ihren metaphorischen Kern (sie sind immer noch Metaphern!), den man durch Bewusstmachung wieder erwecken kann. Auch in den Wissenschaften werden wir oft mit solchen Ausdrücken konfrontiert. Offensichtliche Metaphern nennen wir lebendig. In ihnen findet die Übertragung von einem Begriffsbereich auf einen anderen bewusst statt.

Beleuchten und ausblenden. Eine Metapher beleuchtet einen Teil des Zielbegriffes durch die Zuordnung mit dem Quellenbegriff. Auf der anderen Seite muss man sich bewusst sein, dass eine Metapher auch ausblendet. Was sie nicht speziell betont, wird verborgen, und kann besonders wegen der Kraft der Metapher verborgen bleiben.

Definition durch Metaphern. Metaphern definieren Konzepte oder Begriffe auf eine besondere Art. Dies erkennt man, wenn man sich andere Definitionsarten vor Augen führt. Man kennt normalerweise zwei Arten. Die eine baut auf Abstraktion auf, die andere nennt man Homonymie. Nehmen wir als Beispiel den Begriff *verstärken* in *Sie verstärkt ihr Argument* und *Er verstärkt die Zwischenwand in der Wohnung*. Die Abstraktionsvorstellung von Definition nimmt an, dass es einen allgemeinen, abstrakten Begriff *verstärken* gibt, von dem die beiden Verwendungsarten verschiedene Beispiele sind. Sie stehen also etwa auf gleicher Ebene (abgeleitet vom abstrakten Begriff), haben darüber hinaus aber nichts miteinander zu tun. Homonymie, im extremsten Sinn, nimmt an, dass hier rein zufällig das selbe Wort für zwei vollkommen verschiedene Bedeutungen verwendet wird (eine ausführliche Beschreibung dieses Themas findet man in Lakoff and Johnson, 1980, Chapter 18). Falls man die beiden Beispiele aber im Zusammenhang mit der Metapher *ein Argument ist ein Gebäude* sieht, so ergibt sich eine vollkommen andere Vorstellung der Bedeutung von *verstärken* im Ausdruck *Sie verstärkt ihr Argument*. Das Verständnis, das die Metapher liefert, gründet auf unserem (intuitiven und konkreten) Alltagswissen über die Bedeutung und das Verstärken einer Wand. Metaphern kreieren also ein Bedeutungsgefüge, das es in dieser Art sonst nicht gibt. Metaphorische Definitionen sind ganzheitlich und erzeugen Bedeutung. Das Verständnis eines Begriffs ergibt sich erst durch das Wissen um den in der Metapher herangezogenen Begriff. Ein Begriff wird also nicht in seiner eigenen Welt definiert, sondern durch den Bezug zu einer anderen.

Der Bezeichnung *Definition* sollte nicht missverstanden werden. Oft wird Definition im abstrakten mathematischen Sinne verwendet, was dazu führt, dass wir eine Definition als eindeutig und präzise betrachten. Eine solche Definition gibt dem Begriff eine einzige und feste Bedeutung. Metaphorische Definition ist anders. Die Anwendung von Metaphern ist ein aktiver, konstruktiver Prozess. Man sollte Metaphern aktiv einsetzen, um einen Begriff von Fall zu Fall auf die eine oder andere Art zu beleuchten, so wie man das Licht einer Taschenlampe im Raum herumgleiten und auf verschiedene Gegenstände fallen lässt. Hier ist eine Metapher: *eine Metapher ist ein Suchscheinwerfer*.

2.3 Verursachen, machen, erzeugen: Kausalität und Prozesse

Das Konzept *Verursachen* und Vorstellungen über *Prozesse* gehören mit zu den grundlegenden Erfahrungsbereichen der Menschen. Aus der Grunderfahrung des Verursachens wird durch metaphorische Erweiterung *Machen* und *Erzeugen*. All diese Begriffe sind zentral für ein Verständnis der Physik.

Direkte Verursachung: Prototyp der Vorstellung von Kausalität. Am Anfang unserer Vorstellungen über Kausalität steht die Erfahrung der direkten Manipulation (Lakoff and Johnson, 1980,

pp. 69-71). Das Konzept besteht aus verschiedenen Teilen (verschiedene immer wiederkehrende Erfahrungen) und bildet eine Ganzheit, die für uns Menschen fundamentaler ist als die Teile (also eine Gestalt). Der Kern des Konzepts enthält Begriffe wie Agent (Handelnder) und Patient (Erleidender), Plan, Änderung, usw. Hier sind ein paar der Elemente, die Lakoff und Johnson anführen:

- Der Agent hat die Änderung eines Zustandes im Patienten im Sinn.
- Die Änderung des Zustandes ist physisch.
- Der Agent hat einen Plan, um sein Ziel zu erreichen.
- Der Agent ist eine Energiequelle, der Patient ist das Ziel dieser Energie (d.h. die Änderung im Patienten ist das Resultat einer äusseren Energiequelle).
- Der Agent berührt den Patienten mit seinem Körper oder durch ein Instrument.
- ...

Dieser Kern wird, wie schon gesagt, durch metaphorische Erweiterung auf die Begriffe *Machen*, *Verwandeln* und *Erzeugen* übertragen (Lakoff and Johnson, 1980, Chapter 14). Die Metaphern sind *Das Objekt kommt aus der Substanz*, *Die Substanz geht in das Objekt*, und *Erzeugung ist Geburt*. Beispiele dafür sind *Ich habe eine Vase aus dem Lehm gemacht*, *Eis hat sich in Wasser verwandelt* und *Universitäten sind Inkubatoren für neue Ideen*. Grundlegende Konzepte wie *Substanz* und *Behälter, innen und aussen*, werden für diese Erweiterung herangezogen. Beachten Sie, dass Kausalität also sowohl mit Agent-Patient Verhältnis (im ursprünglichen Sinn des Wortes *verursachen*) als auch mit *machen*, *wandeln* und *erzeugen* zu tun hat. Die hier angesprochenen Punkte werden im Zusammenhang mit dem Begriff *Energie* für die Physik interessant (Abschnitt 6.4).

Prozesse. Die Erfahrung von Kausalität hängt aufs Engste mit der von Prozessen zusammen. Es überrascht darum nicht, dass der Begriff *Prozess* auch eine metaphorische Struktur hat. Wenn wir uns überlegen, wie wir von Prozessen sprechen, so sehen wir, dass Metaphern wie *Prozesse sind Objekte*, *Prozesse sind Behälter*, *Prozesse sind bewegte Objekte* vorkommen. Natürlich hängen Prozesse auch mit der *Zeit* zusammen, über die wir übrigens ganz ähnlich denken (Lakoff and Johnson, 1980).

2.4 Visuelle Metaphern

In unserer Kultur stützen wir uns sehr stark auf die geschriebene Sprache und damit auf sprachliche Metaphern. Mindestens in anderen Kulturen sind visuelle Metaphern aber stark verankert. Dort sind sie wesentliche Vehikel des Denkens. Bei nordamerikanischen Urvölkern oder in Asien spielen das Medizinrad oder die Mandala Rollen, die bei uns geschriebene Texte übernehmen. Robert St. Clair (2000) beschreibt in einer Arbeit, wie Kinder aus nordamerikanischen Stämmen Aufsätze schreiben, und welche Schwierigkeit wir haben, sie zu verstehen. Während wir die auf die Griechen zurückgehende Tradition von Anfang, Hauptteil, Ende und treibende These für den Aufbau eines Aufsatzes verwenden, scheint bei Indianern das Medizinrad (ein Kreis mit einem Kreuz durch die Mitte, das den Kreis in vier Teile teilt) die wesentliche Metapher für den Aufbau einer Geschichte und eines Argumentes zu sein. Sie fangen, bildlich gesprochen, auf irgendeiner der Achsen an, bewegen sich ins Zentrum und gehen von dort in eine andere Richtung. Sie kommen immer zum Zentrum, bevor sie in irgendeine Richtung losgehen.⁷

Grafische und visuelle Elemente sind in unserer Kultur sicher auch wichtig. Es scheint sogar, als ob wir uns mit unseren neuen technischen Möglichkeiten (Film, Computer) wieder verstärkt eine visuell geordnete Welt aufbauen. Wenn es stimmt, dass bestimmte Kulturen hauptsächlich visuelle Metaphern verwenden, dass also visuelle Metaphern genauso verwendet werden können wie sprachliche, um unsere Erfahrung zu strukturieren, so sollten wir der Möglichkeit der Verwendung von Bildern für das Verstehen grosse Bedeutung zumessen.

3 Höhen und Tiefen: Antrieb und physikalische Prozesse

In diesem und den nächsten beiden Abschnitten werde ich einen kurzen Abriss der Physik als Systemwissenschaft (PSS) darstellen. Die Beschreibung wird hauptsächlich von Alltagssprache, Bildern und Diagrammen Gebrauch machen. Ausführlichere Beschreibungen, einfache und formale, der hier dargestellten Physik finden sich in Fuchs, Ecoffey, Schütz (2003), Borer et al. (2000), Herrmann (1995-2002), Fuchs (1996-1998), Burkhardt (1987), Falk und Herrmann (1978-1982), Falk et al. (1983), Schmid (1982).

Phänomene, die uns relativ direkt zugänglich sind—im Gegensatz zu vielen, zu denen wir nur mit grossem technischem Aufwand Zugang finden—konfrontieren uns zuerst einmal mit dem, was ich verallgemeinert “Höhen” und “Tiefen” nenne. Wasser fliesst von selber von hohen zu tiefen Stellen—Wasserfälle sind das schönste Zeugnis dieser Beobachtung (die gleichzeitig auch schon eine Interpretation ist).

3.1 Wasserfälle und kommunizierende Gefässe

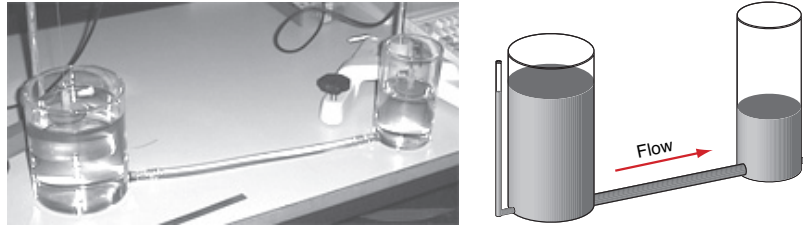
Wasserfälle und Flüsse geben uns sehr direkte Einsicht in einen Typ von physikalischen Vorgängen. In beiden Fällen sehen wir, dass Wasser von höher zu tiefer gelegenen Stellen fliesst (Fig. 1). Dieses Schema wird sich als “Urschema” herausstellen, das bei vielen anderen Phänomenen wieder auftritt, oder aufzutreten scheint (vorsichtig formuliert: wir interpretieren die Beispiele so).



Figur 1: Beispiele von Wasserfällen. Wasser fliesst von selber von höheren zu tieferen Stellen. Das passiert auch in anderen Situationen wie in Flüssen oder im Haushalt. Beachten Sie, dass sich Wasserfälle aufteilen können (zwei oder mehr Fälle parallel, oder dass sie in Schritten fallen können, dass also die Höhendifferenz unterteilt wird).

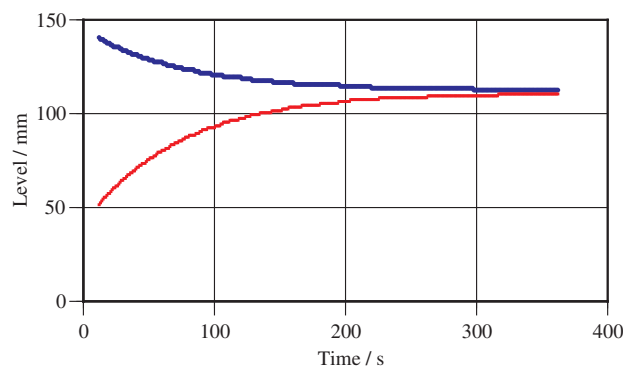
Wenn wir eine leicht künstlich anmutende Situation kreieren, die aber immer noch sehr viel mit den ursprünglichen Phänomenen zu tun hat, so sehen wir, dass ein Höhenunterschied als die Ursache für den Vorgang des Fliessens angesehen werden kann (Fig. 2). In zwei kommunizierenden Gefässen, d.h. durch einen Schlauch verbundenen Tanks, fliesst Wasser aus dem Tank,

wo das Flüssigkeitsniveau höher ist, in den anderen, wo das Niveau tiefer ist. Der Vorgang hört auf, wenn sich die Niveaus aneinander angeglichen haben.



Figur 2: Ein Beispiel von zwei kommunizierenden Gefässen, die mit einer Flüssigkeit gefüllt sind. Die Gefässe kommunizieren durch einen an den Böden angebrachten Schlauch.

Die direkte Beobachtung des Vorganges in den beiden kommunizierenden Flüssigkeitsgefässen zeigt, wie sich die Niveaus mit der Zeit angleichen (Fig. 3). Sie tun das anfänglich schnell, später langsamer. Wenn das gleiche Niveau in beiden Gefässen erreicht wurde, so hört die Flüssigkeit auf, vom einen in das andere Gefäss zu fließen.



Figur 3: Direkte Beobachtung der Niveaus von Rapsöl in zwei miteinander verbundenen Gefässen.

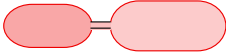
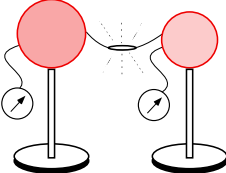
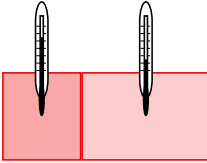
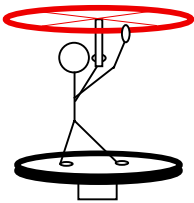
Zusammenfassend könnte man das folgende intuitive Modell formulieren. Flüssigkeiten können fließen. Von selbst fließen sie von höher zu tiefer gelegenen Stellen. Eine Höhendifferenz kann als Antrieb eines Fließvorgangs angesehen werden. Die Natur hat die Tendenz, Niveaudifferenzen (wie im Beispiel der kommunizierenden Gefässe) auszugleichen. Hoch und tief sind also fundamentale Vorstellungen, die eine Polarität bilden.

3.2 Hydraulische, elektrische, thermische und mechanische Vorgänge

Polaritäten bevölkern die Welt physikalischer Vorgänge. Neben hoch und tief sind uns warm und kalt, stark und schwach, hell und dunkel, schnell und langsam vermutlich am geläufigsten. *Unterschiede zwischen den Polen* der polaren Gegensätze können bildlich als *Spannungen* beschrieben werden, die wir uns wiederum als *Antriebe* für Fließprozesse vorstellen. Es gibt viele natürliche und technische Situationen, bei denen Fließprozesse vorkommen, oder die mit den selben Worten wie denen aus Abschnitt 3.1 beschrieben werden. Tabelle 1 zeigt solche Beispiele aus Hydraulik, Elektrizität, Wärme und Rotationsbewegung mit entsprechenden Be-

schreibungen und dazugehörigen Wortmodellen. Das thermische Beispiel ist uns sicher sehr geläufig. Bringt man zwei verschieden warme Körper in Kontakt, so wird der heissere kühler und der kühlere heisser, bis sie beide gleich warm sind.

TABELLE 1. Examples of physical processes and word models

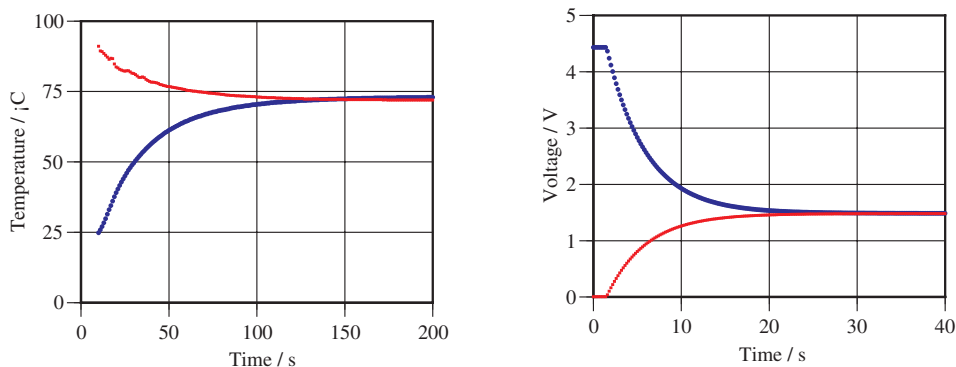
Type of process	System description	Word model
<p>Hydraulics</p> 	<p>Compressed air in a container is allowed to flow into a second one. The initial pressures of the air in the two tanks are different. Air flows until the pressure is the same in both containers.</p> <p>Niveaugrösse: <i>Druck</i></p>	<p>Air flows from the tank where the pressure is higher to the one where it is lower; the reason is the difference of pressures in the containers. The pressure acts as a hydraulic level. When the levels are equal, the process stops.</p>
<p>Electricity</p> 	<p>Zwei isolierte Metallkugeln sind geladen. Elektrometer zeigen an, dass die beiden Kugeln verschieden geladen sind. Wenn sie mit einem Draht verbunden werden, in welchem eine kleine Glühlampe montiert ist, leuchtet diese Lampe kurz auf.</p> <p>Niveaugrösse: <i>Elektrisches Potential</i></p>	<p>Elektrizität fliesst von der Kugel mit dem höheren Ladungsniveau zur anderen. Die Elektrizität fliesst durch den verbindenden Draht und lässt die Lampe leuchten und zwar nur so lange eine Niveaudifferenz vorhanden ist.</p>
<p>Heat</p> 	<p>Zwei verschieden warme Körper berühren sich. Ein Thermometer zeigt an, dass der eine der beiden heisser ist. Nach einer gewissen Zeit sind die Temperaturen der beiden Körper gleich geworden.</p> <p>Niveaugrösse: <i>Temperatur</i></p>	<p>Wärme fliesst vom heisseren zum kälteren Körper. Dabei wird der wärmere Körper kühler während sich der kältere erwärmt. Solange eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Körpern vorhanden ist, fliesst Wärme vom wärmeren zum kälteren Körper.</p>
<p>Rotation</p> 	<p>Eine Person steht auf einem Drehtisch. Sie hält ein rotierendes Rad so, dass die Drehachsen von Person und Rad parallel sind. Die Person verlangsamt die Rotation des Rades durch Bremsen mit der Hand am Reifen. Dadurch beginnt sich die Person auf dem Drehtisch selbst in der Richtung des Rades zu drehen.</p> <p>Niveaugrösse: <i>Winkelgeschwindigkeit</i></p>	<p>Das drehende Rad hat "Dreh-schwung". Durch das Abbremsen des Rades fliesst Drehimpuls vom Velorad zur Person auf dem Drehtisch. Durch Aufnahme von Drehschwung wird die Person in Rotation versetzt. Drehimpuls fliesst so lange, bis sich Rad und Person gleich schnell drehen.</p>

Zu jedem Typ Vorgang gehört also eine Grösse aus einer Polarität (Tabelle 2). Man kann sich die Werte einer solchen Grösse auf einer Linie aufgereiht vorstellen, mit den Extremen der beiden Pole an den Enden der Linie. Die typischerweise beobachteten Werte liegen dann irgendwo auf der Linie zwischen den Extremen.

TABELLE 2. Physikalische Prozesse und zugehörige Polaritäten

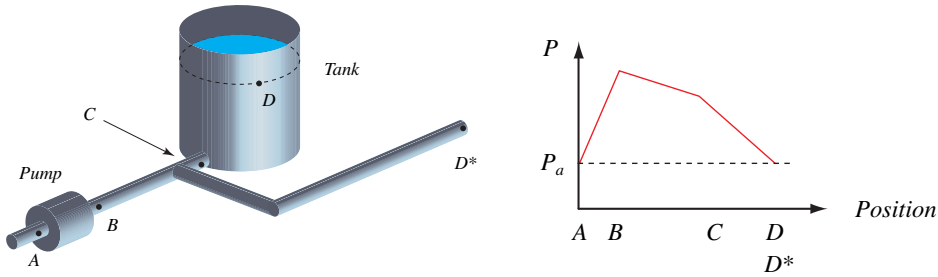
Prozess	Polare Grösse	“Spannung” oder “Antrieb”
Hydraulisch	Druck	Druckdifferenz
Elektrisch	Elektrisches Potential	Potentialdifferenz (= elektrische Spannung)
Thermisch	Temperatur	Temperaturdifferenz
Rotationsmechanisch	Winkelgeschwindigkeit	Differenz der Winkelgeschwindigkeit
Translationsmechanisch	Geschwindigkeit	Geschwindigkeitsdifferenz
Chemisch	Chemisches Potential	Differenz des chemischen Potentials (= chemische Spannung)
Gravitation	Gravitationspotential	Differenz des Gravitationspotentials (= Gravitationsspannung)

Falls wir nun das Bild von Wasserfällen als Vergleich mit den anderen Vorgängen borgen, so lassen sich die polaren Grössen als *Niveaus* bezeichnen, und die Antriebe sind *Niveaudifferenzen*. Verschiedene Prozesse verhalten sich ähnlich, wenn wir sie auf diese Weise beschreiben (siehe Fig. 4).



Figur 4: Werden zwei verschieden warme Körper (ein kalter Kupferblock in heissem Wasser, links) oder zwei verschieden stark geladene elektrische Kondensatoren (rechts) miteinander verbunden, so gleichen sich die Temperaturen (links) oder die elektrischen Potentiale (rechts) einander an. Die Vorgänge laufen, solange es einen Unterschied in der dem Vorgang zugehörigen polaren Grösse (Temperatur oder elektrisches Potential), d.h. eine Spannung, gibt.

Stromkreise. In einem aus mehreren Elementen bestehenden hydraulischen System geht die Niveaugrösse, d.h. der Druck, rauf und runter. Wenn man sich entlang eines Pfades in einem System bewegt, so ist das bildlich gesprochen, wie wenn man sich in einer Landschaft mit Höhendifferenzen bewegte (Fig. 5). Das Bild lässt sich auf die verschiedenen Typen von Vorgängen übertragen. Das Resultat kennt man hauptsächlich aus der Elektrizität. Wenn man entlang eines geschlossenen Pfades durch ein System geht, kommt man wieder an den Ausgangspunkt. Das bedeutet, dass die Summe aller überwundenen “Höhendifferenzen” gleich Null sein muss.



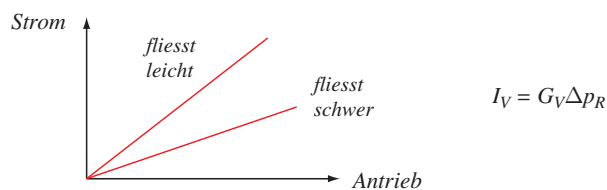
Figur 5: Wenn man in einem geschlossenen hydraulischen Stromkreis läuft, so müssen sich alle Druckdifferenzen zusammen zu Null aufaddieren. Es ist, als ob man sich in einer Landschaft mit Höhendifferenzen bewegte. (Der Stromkreis ABCD wird über die Luft von D nach A geschlossen.)

Spezielle Gesetze. Wenn wir die verschiedenen Typen von Niveaudifferenzen (Tabelle 2) als Antriebe von Prozessen betrachten, dann stellen sich mindesten zwei konkrete Fragen. Wie beschreiben wir einen Prozess, und wie machen die Spannungen das genau?

Prozesse beschreiben wir durch das Fließen von Grössen wie Wasser, Luft, Elektrizität oder Wärme. Die Wortmodelle in diesem und dem vorhergehenden Abschnitt deuten darauf hin (siehe Tabelle 1). Falls wir also sagen, dass Prozesse darin bestehen, dass gewisse Grössen fließen, so können wir einen Prozess durch Grössen quantifizieren, die Flüsse oder Transporte festlegen. Man nennt eine solche Grösse in der Physik normalerweise einen *Strom* (Abschnitt 4).

Ströme quantifizieren also unsere Idee des Transportes, des Fließens, von Wasser, Luft, Elektrizität, Wärme, usw. Ein Strom ist gross oder stark, wenn er in einer gewissen Zeitspanne viel von der entsprechenden Grösse transportiert. Er ist klein oder schwach, falls er wenig davon transportiert. Die Frage danach, wie nun eine Niveaudifferenz, eine Spannung, für einen Strom verantwortlich ist, kann man so umformulieren: wie hängt der Strom von der Niveaudifferenz (also z.B. einer Höhendifferenz oder einer Temperaturdifferenz; siehe Tabelle 2) ab? Wovon hängt er sonst noch ab?

Die einfachste Antwort auf die erste Frage ist die folgende. Wenn der Antrieb Null ist, so ist es auch der Strom. Wenn der Antrieb steigt, so steigt auch der Strom. Verdoppelt man den Antrieb, so verdoppelt sich der Strom. Falls diese Idee stimmt, so ist der Strom proportional zum Antrieb (Fig. 6). Der Strom hängt natürlich noch von den Materialien und den Schichten ab, durch die er fließt. Wie leicht diese die fließende Grösse durchlassen, ersieht man durch die Steigung der Geraden im Diagramm (Fig. 6 heisst *Stömungscharakteristik*). Dieser Faktor heisst *Leitwert*. Man kann auch den Kehrwert davon nehmen, und diese Grösse heisst dann *Widerstand*.

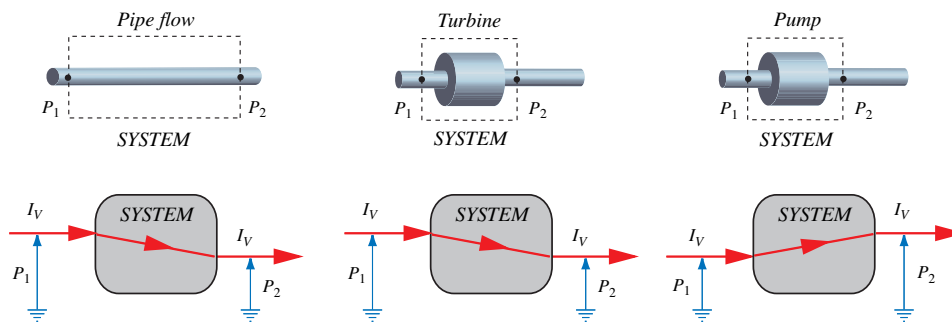


Figur 6: Der Zusammenhang zwischen Strom und Antrieb heisst Strömungscharakteristik. Im einfachsten Fall ist die Charakteristik linear. G_V ist der Faktor, der sagt, wie leicht das Fluid strömt. Dieses Diagramm ist für die Hydraulik gezeichnet, kann aber direkt auf andere Prozesse übertragen werden.

3.3 Prozess-Diagramme

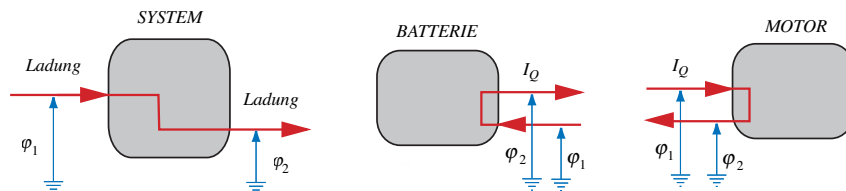
Die mentalen Bilder, die hier zur Beschreibung der Vorgänge mit Hilfe von Sprache benutzt wurden, können auch grafisch umgesetzt werden. Sie erlauben eine zusätzliche Orientierung, und die Manipulation von grafischen Elementen ergibt zusätzliche Möglichkeiten, über die Zusammenhänge nachzudenken. Das Grundelement der Bilder ist der Wasserfall.

Systeme, Niveaus, Ströme. Wir stellen uns natürliche oder technische Objekte oder Elemente vor, in die Wasser oder andere Größen wie Wärme oder Elektrizität hinein oder heraus fließen. Das geschieht bei verschiedenen Niveaus oder Drücken (Fig. 7). Also stellen wir System und Vorgang durch Kästen und Pfeile dar. Der Kasten bezeichnet ein Objekt, die Pfeile entweder die fließenden Größen oder die dazugehörigen Niveaus.



Figur 7: In einem Rohr sinkt der Druck der fließenden Flüssigkeit in Stromrichtung wegen Reibung. Die Flüssigkeit fließt also von selber von höherem zu tieferem Druck. In einer Turbine geschieht das Selbe, in einer Pumpe genau das Umgekehrte. Eine Pumpe pumpt Wasser von einem Ort, wo der Druck tiefer ist zu einem, wo er höher ist.

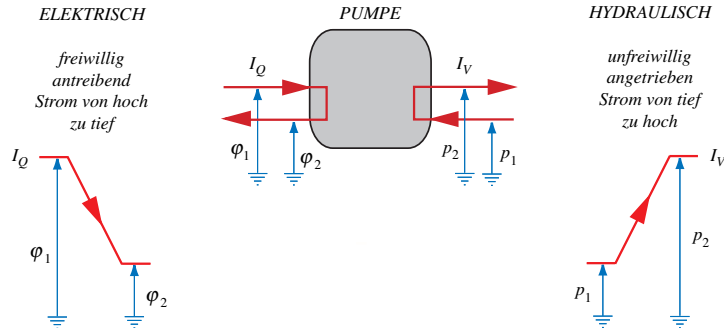
Was für hydraulische Systeme und Prozesse gilt, lässt sich auch auf elektrische und andere Beispiele übertragen (Fig. 8). Z.B. funktioniert ein elektrischer Motor auf der elektrischen Seite so, dass Elektrizität (die man auch elektrische Ladung nennt) von einem höheren Potential durch die Maschine zu einem tieferen Potential fließt. In einer Batterie geschieht das Umgekehrte. Sie ist wie eine Pumpe, hier wird Elektrizität von einem tieferen auf ein höheres elektrisches Niveau gepumpt.



Figur 8: Prozessdiagramme für einige elektrische Prozesse (links: allgemein; Mitte: Batterie als “Elektrizitätspumpe”; rechts: elektrischer Motor). I_Q ist das Symbol für einen Ladungsstrom, φ für das Potential.

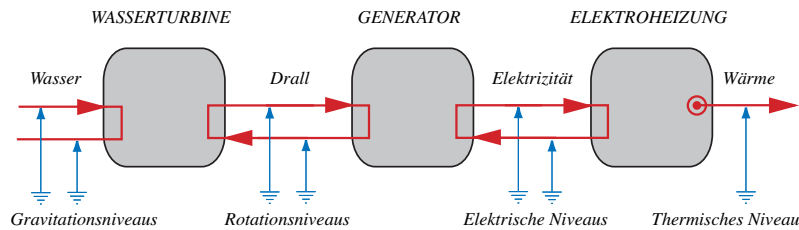
Kopplung. Nun sind wir in der Lage, Prozessdiagramme für gekoppelte Prozesse darzustellen. Was damit gemeint ist, sieht man sehr einfach an vielen technischen Geräten, die wir aus dem Alltag kennen. Eine elektrisch angetriebene Wasserpumpe koppelt einen hydraulischen an einen elektrischen Prozess (Fig. 9). Ich bezeichne den freiwilligen elektrischen Prozess (Elektri-

zität fließt vom höheren zum tieferen Niveau) als den antreibenden, und den hydraulischen Prozess als den angetriebenen (ein Fluid wird von tieferem auf höheren Druck gebracht).



Figur 9: Prozesse werden aneinander gekoppelt. Ein Prozess kann einen anderen antreiben. Beispiele: elektrische Wasserpumpe (elektrisch-hydraulisch); Batterie: chemisch-elektrisch; Photosynthese: Licht-chemisch; Tauchsieder: elektrisch-thermisch.

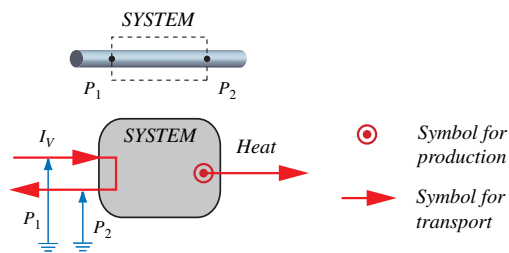
Prozessketten. Schliesslich kann man ganze Prozessketten aufbauen, indem man Systeme mit ihren Prozessen aneinander hängt (Fig. 10).



Figur 10: Eine Prozesskette mit Wasserturbine, elektrischem Generator und Elektroheizung.

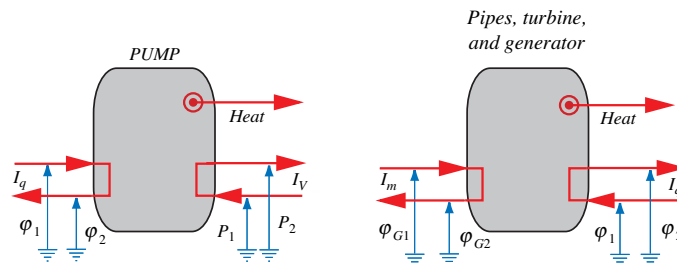
3.4 Bei Prozessen wird Wärme produziert

Einer der wichtigsten alltäglichen Vorgänge ist die Wärmeerzeugung. Wenn wir unsere Hände reiben, wenn eine Flüssigkeit durch ein Rohr fließt (Fig. 11), bei allen anderen Reibungsprozessen, in einem Feuer, in einer elektrischen Herdplatte, bei vielen chemischen Reaktionen und bei anderen Prozessen wird Wärme erzeugt. Die hier diskutierten Ausgleichs- oder Angleichsvorgänge (Fig. 3, Fig. 4 und Tabelle 1) sind Prototypen von Wärme produzierenden Prozessen. Man nennt Vorgänge, bei denen Wärme entsteht, *dissipativ*.



Figur 11: Durch die Reibung einer Flüssigkeit, die durch ein Rohr fließt, entsteht Wärme.

Die Prozessdiagramme in Fig. 12 zeigen, was wir typischerweise beobachten. Wenn ein Prozess einen anderen antreibt, z.B. ein elektrischer einen hydraulischen in einer elektrischen Wasserpumpe, so entsteht gleichzeitig auch Wärme. Normalerweise treibt ein Prozess also immer mindestens zwei Prozesse an: den gewünschten und einen unerwünschten, nämlich die Produktion von Wärme. Die entstehende Wärme fließt im Allgemeinen aus dem System an die Umwelt (Fig. 12).



Figur 12: Zwei Beispiele von Systemen, in denen Prozesse gekoppelt werden. Links ist eine Pumpe dargestellt, bei der ein hydraulischer Prozess an einen (antreibenden) elektrischen gekoppelt ist. Rechts sieht man das Prozessdiagramm für die Kombination aus Rohren, Turbine und Generator in einem hydroelektrischen Kraftwerk. Hier treibt ein Gravitationsprozess am Ende einen elektrischen an, und natürlich auch wieder den unerwünschten thermischen, der aus der Produktion von Wärme besteht.

Umkehrungen. Es gibt nur ganz wenige reale Prozesse, die ohne Wärmeproduktion ablaufen können. Dazu gehört z.B. elektrische Supraleitung (Elektrizität fließt durch Materialien, ohne dass ihr dabei ein Widerstand entgegengesetzt würde). Prozesse, die nicht von Wärmeproduktion begleitet werden, nennt man ideal. Ideale Prozesse kommen typischerweise nur in unseren Modellen, in denen wir Reibung oder anderes vernachlässigen, vor.

Die Diagramme in Fig. 12 zeigen etwas ganz Wichtiges. Das eine System ist (fast) die Umkehrung des anderen. Wenn man eine elektrisch angetriebene Wasserpumpe umkehrt, kriegt man ein System aus Turbine und Generator. Hier treibt ein hydraulische Vorgang einen elektrischen an (die Ströme und die Niveaus werden ausgetauscht). Etwas kehrt sich bei der Umkehrung aber nicht um: Wärme entsteht immer noch, sie fließt immer noch aus dem System hinaus. Es ist nicht plötzlich so, dass die hinein fließt und verschwindet.

Irreversibilität. Dieser Punkt, der im nächsten Aufsatz eine grosse Rolle spielen wird, ist uns aus den Beobachtungen im Alltag bekannt. Prozesse laufen im Allgemeinen nur in eine Richtung ab, sie sind unumkehrbar, oder wie man in der Physik sagt, sie sind *irreversibel*. Nun verstehen wir, was das heisst. Prozesse sind nicht vollkommen unumkehrbar, sie haben nur einen irreversiblen Aspekt: es wird immer Wärme produziert, nie vernichtet. Irreversible Prozesse sind also dissipativ, dissipative Prozesse sind irreversibel.

4 Substanzen und Fluide: Mengen und Bilanzen

Bei der Beschreibung der Vorgänge in Abschnitt 3 habe ich von einer wichtigen Sache kein Aufhebens gemacht. Die Beschreibungen verraten es aber: bei jedem Prozess kommt eine fundamentale Grösse vor, die nicht einen Niveaucharakter hat (wie Druck oder Temperatur), sondern den Charakter einer *Mengengrösse*. Diese Grössen haben Substanzcharakter, auch wenn das Bild nicht wörtlich zu nehmen ist.

Diese Grössen sind Wasser und Luft (allgemein die Fluide), Elektrizität, Wärme, Bewegungsmenge in Rotation und Translation (man nennt diese Drall und Impuls), und chemische Stoffe. Sie stellen wir uns nicht als Polaritäten und Höhen und Tiefen vor, sondern wir fragen, wieviel es davon gibt, wo sie sind, woher sie kommen und wohin sie gehen.

4.1 Die Elemente in verschiedenen Kulturen

Es gehört scheinbar zu den Grundvorstellungen verschiedenster früher (wahrscheinlich noch mythischer) Kulturen, anzunehmen, dass die Welt aus ein paar wenigen Elementen gemacht ist. Meistens sind es vier oder fünf Grundelemente, eventuell noch durch ein spezielles ergänzt. In der Griechischen Kosmologie, die z.B. im Timaios von Plato (Ekschmitt, 1989) beschrieben wird, sind das die vier berühmten Elemente *Erde, Wasser, Luft* und *Feuer*. Sie werden noch durch das himmlische fünfte Element (Quintessenz), aus dem die Planeten und Gestirne gemacht sind, ergänzt. Diese Elemente haben bestimmte Eigenschaften und verhalten sich auf eine Weise, dass man die Phänomene der Natur damit erklären kann.

Diese Elemente repräsentieren also unsere Vorstellung von Substanzhaftigkeit. Neben Vorstellungen über unsere Orientierung im Raum (oben, unten, vorne, hinten, innen, aussen, usw.) gehören diese ontologischen Bilder zu den grundlegenden Ideen, mit denen wir die Welt ordnen (Abschnitt 2).

Prozesselemente. Es ist wichtig zu erkennen, dass diese Elemente nicht so einfach mit unseren chemischen Elementen verglichen werden können. Schliesslich war es auch früheren Menschen klar, dass es sehr viele verschieden Substanzen gibt. Aber es gibt eben nur die vier klassischen Elemente (bei den Chinesen waren es fünf). Vermutlich macht es mehr Sinn, die vier Elemente und ihre Bedeutung mit den Mengengrössen der Physik, wie Sie sie hier dargestellt finden, zu vergleichen. Ich bezeichne daher Fluide, Elektrizität, Wärme, Bewegungsmenge, etc., als *Prozesselemente* (Tabelle 3). Sie sind die substanzialen Grössen, die bei Prozessen vorkommen. Eine bestimmte Grösse ist immer für ihren Typ von Vorgang verantwortlich, genauso wie immer zu einem Prozess eine bestimmte Niveaugrösse gehört (Tabelle 2).

TABELLE 3. Mengengrössen (Prozesselemente)

Prozess	Mengengrösse	Strom der Mengengrösse Produktionsrate
Hydraulisch	Volumen	Volumenstrom
Elektrisch	Elektrische Ladung	Ladungsstrom ("Strom")
Thermisch	Wärme	Wärmestrom Wärmeproduktionsrate
Rotationsmechanisch	Drall (Drehimpuls)	Drehimpulsstrom
Translationsmechanisch	Bewegungsmenge (Impuls)	Impulsstrom
Chemisch	Stoffmenge	Stoffmengenstrom Produktionsrate der Stoffmenge
Gravitation	(schwere) Masse	Massenstrom

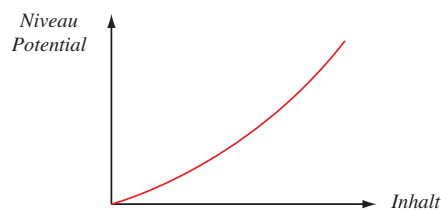
4.2 Mengengrößen und Bilanzen

Die Mengenvorstellung ist sicher am einfachsten an einem “Element” wie Wasser nachvollziehbar. Es gibt in Seen, Flüssen, Gefässen, usw. bestimmte Mengen von Wasser. Diese Mengen können sich im Laufe der Zeit durch Zu- und Abflüsse ändern. Wir erwarten aufgrund unserer alltäglichen Erfahrungen, dass es einen Zusammenhang zwischen den Zu- und Abflüssen und der Änderung der Mengen in einem Behälter geben muss.

Dieser Zusammenhang wird als *Bilanzgesetz* formuliert. Wir sagen, dass die Zu- und Abflüsse zusammen festlegen, wie schnell sich die Menge von Wasser, Elektrizität, Wärme, usw. in einem Speicher ändert. Kennt man die Ströme, so lässt sich ausrechnen, wie sich die gespeicherte Menge im Laufe der Zeit verhalten wird. Eine einfache Art, ein Bilanzgesetz darzustellen und gleich für Berechnungen bereit zu machen, sind die Diagramme, wie man sie in systemdynamischen Modellen aufbaut (Abschnitt 4.3).

Bei einem Punkt müssen wir noch vorsichtig sein. Falls die betrachtete Mengengröße erzeugt und/oder vernichtet werden kann (wie das bei chemischen Stoffen, Lebewesen, Autos und Wärme der Fall ist), so muss das Bilanzgesetz erweitert werden. Zusätzlich zu den Strömen sind nun auch die Raten, mit denen die Größen entstehen oder zerstört werden, in die Rechnung mit einzubeziehen.

Spezielle Gesetze. In Abschnitt 3.2 habe ich Strömungsprozesse als Folge von Antrieben (Niveaudifferenzen) dargestellt. Also stellte sich die Frage, wie Ströme und Antriebe zusammenhängen. Hier gibt es eine ähnliche Frage. Wenn wir Wasser oder Luft in ein Druckgefäß oder Blut in die Aorta packen, so steigt der Druck des Fluids. Wenn wir mehr Elektrizität in einen Kondensator oder mehr Wärme in einen Körper packen, so steigen das elektrische Potential des Kondensators oder die Temperatur des Körpers. Also hängen die Niveaugrößen der gespeicherten Mengen davon ab, wieviel gespeichert ist (Inhalt), und wie der Speicher geartet ist. Den Zusammenhang zwischen Inhalt und Niveau nennt man *kapazitive Charakteristik* (Fig. 13).



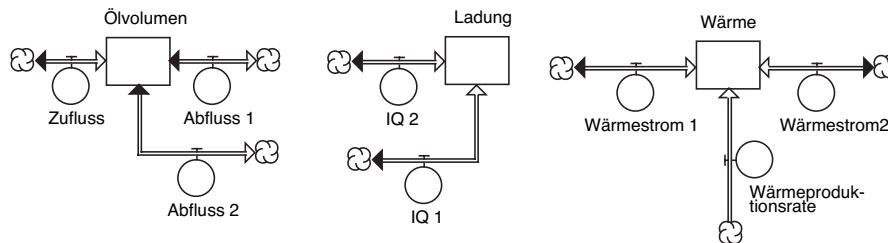
Figur 13: Die Form des Zusammenhangs zwischen Inhalt und Potential (z.B. zwischen Flüssigkeitsmenge und Druck) hängt vom Speicher ab (z.B. in einem Schädel mit Gehirn sieht die Kurve etwa so aus).

4.3 Systemdynamische Diagramme

Die Idee einer Bilanz kann in systemdynamischen Werkzeugen äusserst einfach formuliert werden (Fig. 14). Diagramme mit Symbolen für Speicher (Reservoir) und Flüsse oder Produktionsraten erzeugen direkt die formale Version des Bilanzgesetzes, d.h. die zugehörige Gleichung, die mit numerischen Methoden des Werkzeugs gelöst werden kann.

Natürlich ist ein systemdynamisches Modell mit der Formulierung eines Bilanzgesetzes noch nicht fertig gestellt. Man braucht konkrete Ausdrücke für die Ströme und Erzeugungsraten. Dazu dienen Ideen, wie sie in den Charakteristiken in Fig. 6 und Fig. 13 ausgedrückt sind. Zusammen mit der Annahme über die Zusammenhänge von Niveaudifferenzen (Fig. 5) erstellt

man damit schon sehr viele Modelle dynamischer physikalischer Vorgänge. Natürlich hält die Natur noch mehr für uns bereit, aber es ist erstaunlich, wieviel wir schon mit vier Ideen (Bilanz, Zusammenhang der Niveaudifferenzen, Stromcharakteristik und kapazitive Charakteristik) verstehen können, und das immer auf die gleiche Weise in den verschiedensten Gebieten.⁸



Figur 14: Drei Beispiele von Bilanzgesetzen. Volumen einer Flüssigkeit in einem Behälter (links), elektrische Ladung eines Kondensators (Mitte) und Wärme in einem Körper (rechts). Da Wärme erzeugt werden kann, kommt zusätzlich zu Wärmeströmen für die Transporte noch die Wärmeproduktionsrate vor.

5 Wandlung und Beständigkeit: Die Rolle der Energie

In der Physik wurde im Laufe des 19. Jahrhunderts die Idee einer zusätzlichen wichtigen Grösse eingeführt, nämlich die der Energie. Die Entwicklung fing mit der Idee der Quantifizierung von Arbeit an und führte etwas später mit der Formulierung der Energie, die in einem Gas gespeichert ist, zu einem ersten Höhepunkt. Langsam wurde die Bedeutung dieser Grösse erweitert. Sie spielt heute bei allen physikalischen Betrachtungen eine wichtige Rolle. Das ist ganz einfach die Folge davon, dass alle Vorgänge in der Natur in der Energie ein verbindendes Element haben.

Die Bedeutung der Energie hat dazu geführt, dass man sie sehr oft als fast alleinige Grösse zur Erklärung von Phänomenen zu Rate zieht. Damit verdeckt man aber mehr über die Prozesse als man aufdeckt. Zudem tut man der Energie selber unrecht. Man versteht diese Grösse nicht, wenn man sie für alles verantwortlich machen will. Die Physik der Systeme gibt uns ein handliches und bildliches Instrument, um die Bedeutung der Energie zu verstehen.

5.1 Ketten von Vorgängen: Zusammenhänge, Wandel und Konstanz

Betrachten Sie einmal die Prozesskette, die in Fig. 10 dargestellt ist, oder das Detail der Koppelung von zwei Prozessen in einem System in Fig. 9. Besonders die Kette suggeriert Vorstellungen, Bilder und Fragen. Offensichtlich werden hier Prozesse aneinander gereiht. Wenn man aus den Augen verliert, dass ein Prozess durch das Fließen der ihm zugehörigen Mengengrösse dargestellt werden kann (in der Figur sind das Wasser, Drall, Elektrizität und Wärme), so kann man die Vorgänge leicht als einen Wandlungsprozess verstehen. Am Anfang steht ein Gravitationsvorgang, oder ein hydraulischer, am Ende ein thermischer. Man könnte versucht sein zu sagen, dass sich die Prozesse ineinander verwandeln. (Allerdings stellt sich die Frage, ob dieses Bild gefühlsmässig und sprachlich Sinn macht: verwandeln tun sich Dinge; ist ein Prozess ein Ding?)

Fügen wir noch etwas zur Beschreibung bei. Wir Menschen scheinen den Wunsch zu haben, hinter der Verwandlung auch Konstanz zu sehen. Wandlung könnte zu unberechenbar sein. Es

muss doch etwas geben, was die Vorgänge miteinander verbindet und unverändert durch die Kette geht. Sonst könnte der Vorgang, der am Anfang der Kette steht, heute ein bestimmtes Resultat und morgen ein anderes liefern.

Diese Vorstellung wurde auf kuriose Art in die Physik eingebaut. Die Grösse, die unsere intuitive Vorstellung befriedigen soll, ist die Energie. In ihr verbindet man dann gleich die beiden Ideen von Wandlung und Konstanz. Energie geht als Menge unbeschadet durch eine Kette, wandelt aber ihr Antlitz von Schritt zu Schritt. Man spricht darum von hydraulischer Energie, Rotationsenergie, elektrischer Energie und schliesslich Wärmeenergie in der Kette in Fig. 10. In einem System, bei der Kopplung von zwei Prozessen, soll die eine Energie in die andere verwandelt werden, ohne sich in der Menge zu ändern. Man sagt also z.B., im Generator würde Rotationsenergie in elektrische Energie umgewandelt.

Diese Redeweisen sind nicht falsch, aber sie verdecken mehr als sie aufdecken und erklären. Neben dem Neuen, wofür die Energie steht, was wir für unser Verständnis der Zusammenhänge brauchen, bürdet man der Energie gleich noch auf, alles Andere, was wir schon über Prozesse gelernt haben, gleich mit erklären zu müssen. Im Begriff elektrische Energie schwingt mit, dass die Energie auch erklärt, was an einem elektrischen Vorgang elektrisch ist. Das haben wir aber bisher mit den Ideen von elektrischem Niveau und elektrischer Mengengrösse (elektrische Ladung, die wir Elektrizität genannt haben) gemacht. Ich möchte zeigen, dass wir den Energiebegriff hauptsächlich für die Beantwortung der einen ungeklärten Frage brauchen, nämlich, wie Prozesse miteinander gekoppelt sind.

5.2 Treibende und angetriebene Prozesse

Die Notwendigkeit einer zusätzlichen Idee zur Erklärung physikalischer Vorgänge sieht man ganz schön bei der Kopplung von Vorgängen (Fig. 9). Wir beschreiben einen Vorgang mit Hilfe von zwei Grössen, Niveaudifferenz und Strom einer Mengengrösse. In Fig. 9 wird der treibende Vorgang mit Hilfe von elektrischer Spannung und elektrischem Strom erklärt, der angetriebene mit Druckdifferenz und mit Wasserstrom. Nun haben aber Spannung und elektrischer Strom überhaupt nichts mit Druck und Wasser zu tun. Die Kopplung der beiden Prozesse bleibt also unverstanden. Speziell bleibt unverstanden, warum der elektrische Vorgang, wenn er auf eine bestimmte Art läuft, immer das selbe Resultat liefert.

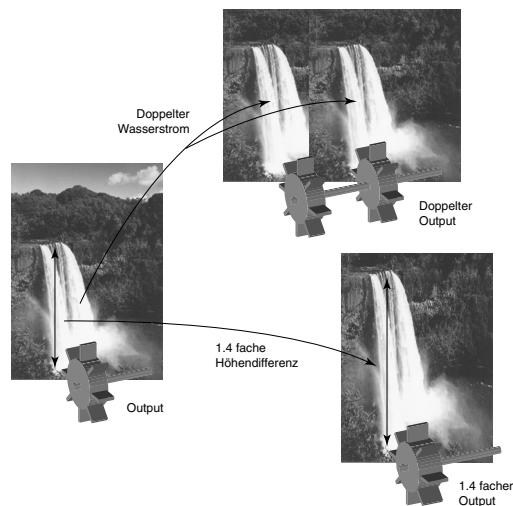
Wir konstruieren nun die Idee einer Grösse, die im ersten Prozess abgegeben und vom zweiten aufgenommen wird. Damit gibt es einen quantitativen Zusammenhang zwischen treibendem und angetriebenem Vorgang. Wir sagen, der erste Prozess gebe (pro Sekunde) so und so viel Energie ab, und diese Energie werde vom angetriebenen Prozess aufgenommen, also für den Prozess verwendet.

Natürlich muss die Rate, mit der der erste Prozess Energie abgibt, von ihm selber abhängen, d.h. von den Prozessgrössen Spannung und elektrischer Strom. Und die Rate, mit der der angetriebene Vorgang Energie aufnimmt, muss von seinen Prozessgrössen abhängen, d.h. von Druckdifferenz und Wasserstrom.

Wie der Zusammenhang herzustellen ist, ergibt sich ziemlich direkt aus dem Wasserfallbild der Prozesse, das ich hier in den Vordergrund der Beschreibung gestellt habe. Stellen Sie sich also jeden antreibenden Vorgang wie einen Wasserfall vor. Es ist doch klar, dass das fallende Wasser pro Sekunde mehr Energie abgibt, wenn der Wasserstrom grösser ist, und zwar bei doppeltem Wasserstrom doppelt so viel (das ist logisch, mit zwei Wasserfällen lässt sich doppelt so viel tun; hier haben wir die Grundidee des Arbeitens wieder vor uns; Fig. 15). Die zweite Grösse,

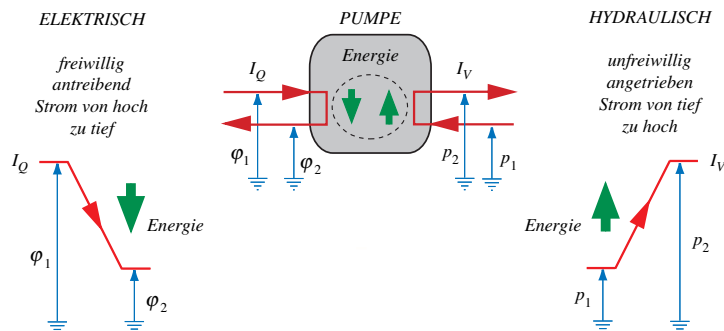
von der das Resultat abhängt, ist die Niveaudifferenz. Hier muss man nun in der Natur nachschauen, d.h. messen und experimentieren, um herauszufinden, wie der Zusammenhang tatsächlich ist. Man findet, was kaum erstaunt, dass die Beziehung zwischen Energieabgabe und Niveaudifferenz wieder eine Proportionalität ist. Also legt man fest, dass die Rate, mit der Energie freigesetzt wird, gleich dem Produkt aus Niveaudifferenz und Mengenstrom sein soll. Die Rate, mit der Energie freigesetzt wird, nenne ich *Prozessleistung*. Also:

$$\text{Prozessleistung} = \text{Niveaudifferenz} \cdot \text{Mengenstrom}$$



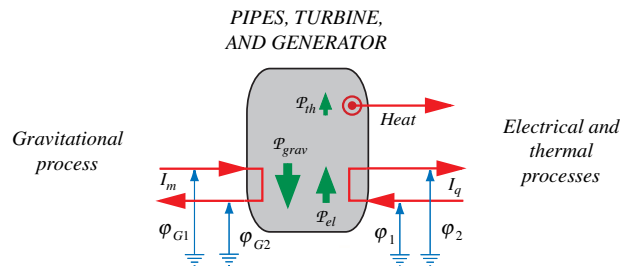
Figur 15: Das Wasserfallbild suggeriert den Zusammenhang zwischen Prozessgrößen (Niveaudifferenz und Mengenstrom) und der Rate, mit der Energie in einem Prozess freigesetzt wird.

Der selbe Zusammenhang gilt auch für den umgekehrten Prozess, das Antreiben eines Stromes vom tieferen auf das höhere Niveau. Die Prozessdiagramme, mit denen wir bisher Systeme und Prozesse symbolisch dargestellt haben, werden nun um die Idee des Freisetzens und Aufnehmens von Energie erweitert. Ich benutze senkrechte dicke Pfeile neben dem "Wasserfall", um die Prozessleistung darzustellen (Fig. 16).



Figur 16: Die Kopplung von zwei Prozessen wird durch eine neue Größe erklärt: Energie. Ein antreibender Prozess setzt Energie mit einer bestimmten Rate frei (die Rate nennen wir Leistung; sie hängt von Niveaudifferenz und Mengenstrom ab). Die freigesetzte Energie wird vom angetriebenen Vorgang aufgenommen. Falls alle freigesetzte Energie für den anvisierten Prozess gebraucht wird, nennen wir ihn ideal.

Wärmeerzeugende Prozesse werden genau gleich in diesem Bild erklärt (Fig. 17). Wird zusätzlich zum anvisierten Prozess noch Wärme erzeugt, so sagt man, dass ein Teil der freigesetzten Energie für diesen parallelen Vorgang, also die Wärmeerzeugung, eingesetzt wird. Für den anvisierten Prozess bleibt also weniger als hundert Prozent übrig; die Vorgänge sind nicht mehr ideal. Man sagt auch, die für die Wärmeproduktion benötigte Energie sei *dissipiert* worden.

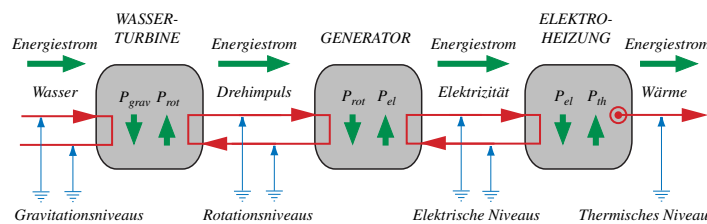


Figur 17: Wenn zusätzlich zum Antreiben des elektrischen Stroms noch Wärme produziert wird, so wird ein Teil der zur Verfügung stehenden Energie für die Wärmeproduktion abgezweigt. Das Verhältnis von Energie für den Nutzvorgang zu freigesetzter Energie nennt man *Wirkungsgrad* der Prozesse.

5.3 Energietransporte und Energiespeicher

Wir verstehen nun die direkte Kopplung von zwei Vorgängen, aber die Idee der Prozessketten und dass dabei etwas unverändert von Anfang bis Ende durchgeht, wurde noch nicht geklärt. Das macht man durch eine Erweiterung der Vorstellung über die Eigenschaften der Energie.

Bei einer Kopplung (Fig. 16) wird Energie freigesetzt und dann aufgenommen. Wir könnten uns damit begnügen zu sagen, die Energie erscheine und verschwinde dann wieder. Das macht man aber nicht. Man konstruiert die Vorstellung, dass Energie, die freigesetzt wird, zuerst dem System zugeführt wird, und dass aufgenommene Energie an ein folgendes System weiter gereicht wird. Wir stellen uns also vor, Energie liesse sich transportieren (Fig. 18). Da die Energie mit den Mengengrößen von einem System zu einem anderen fließt, nennt man die Mengengrößen *Energieträger*. Drehimpuls (Drall) ist also der Energieträger bei Rotationsvorgängen.

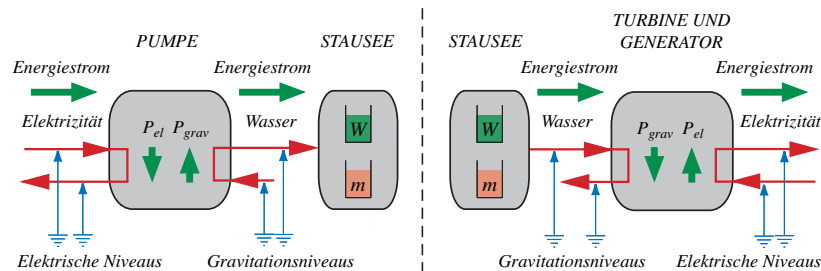


Figur 18: Kopplung von Systemen und Prozessen zu einer Prozesskette. Energie fließt von System zu System.

Um diese Idee zu konkretisieren, führt man den Begriff *Energiestrom* ein, und quantifiziert ihn, d.h. man beantwortet die Frage nach dem Zusammenhang mit den Prozessgrößen. Damit die Idee des *Energiestroms* mit der Leistung kompatibel bleibt, muss ein *Energiestrom* gleich dem Produkt von *Trägerstrom* und zugehörigem *Niveau* sein:

$$\text{Energiestrom} = \text{Niveau} \cdot \text{Mengenstrom}$$

Speicherung von Energie. Man kann Prozessketten unterbrechen und die fehlenden Vorgänge zu einem späteren Zeitpunkt ablaufen lassen. Wenn man das tut, so wird beim vorläufig letzten System die Energie, die man zugeführt hat, nicht wieder abgeführt. Um nicht anzunehmen, dass die Energie verschwindet und zu einem späteren Zeitpunkt wieder produziert wird, nimmt man an, Energie könne in Systemen gespeichert werden. Am Anfang einer Prozesskette steht dann der Abruf von Energie aus einem Speicher (Fig. 19).



Figur 19: Energie kann gespeichert werden. Die “Behälter” in den Kästen für den Stausee symbolisieren Speicher für Energie und für Wasser. Energie wird also zusammen mit dem Wasser gespeichert.

6 Die metaphorische Struktur von PSS

In diesem Abschnitt soll die Theorie der Metaphern und Analogien auf die systemwissenschaftliche Darstellung der Physik (PSS) angewendet werden. Ich werde versuchen, die metaphorische Struktur herauszuarbeiten und zu klären, was die Metaphern und Analogien sind.

Bevor wir die eigentliche Arbeit in Angriff nehmen, möchte ich auf zwei Punkte aufmerksam machen, die in Abschnitt 2 in allgemeiner Form diskutiert wurden. Wenn wir uns fragen, was es heisst, physikalische Begriffe zu verstehen, so sind diese zwei Punkte wichtig. Der erste hat mit der Art der Definition zu tun, die durch eine Metapher möglich wird (im Gegensatz zu Definition durch Abstraktion oder Homonymie, Abschnitt 2.2). Ich habe den Eindruck, dass in der Physik—speziell beim Lernen der Physik—versucht wird, das Verständnis eines Begriffes durch Definition im abstrahierenden Sinn innerhalb des eigenen Begriffsgebäudes aufzubauen. Man kriegt den Eindruck, man könne alle Begriffe durch mathematische Beziehungen definieren, was natürlich Unsinn ist. Man kann sich nicht an den eigenen Haaren aus dem Sumpf ziehen. Letztlich bezieht man sich immer auf etwas, was nicht definierbar ist. Wie man zu einem Verständnis der entsprechenden Grössen kommen soll, bleibt verborgen.

Der zweite Punkt hat mit der Frage zu tun, ob Metaphern auf Ähnlichkeiten fussen, oder ob sie die Wahrnehmung von Ähnlichkeit erst ermöglichen (Abschnitt 2.1). Es scheint, als ob sich die Physik dazu eignet, so quasi apriori Erfahrungen zu machen, auf denen das Wort *Ähnlichkeit* in Grossbuchstaben geschrieben steht. Wenn wir uns die Beobachtungen des Niveaugeichs von Flüssigkeiten und des Angleichs der Potentiale der Wärme, Elektrizität und Bewegung vor Augen halten (Abschnitt 3.2), so sieht die Sache scheinbar klar aus: physikalische Metaphern beruhen auf der direkten Erfahrung von Ähnlichkeit. Stimmt das aber wirklich? Ist es nicht so, dass wir auch hier schon auf ganz grundlegenden Metaphern, die wir gar nicht mehr bewusst wahrnehmen, aufbauen? Sind es Metaphern, die die hier diskutierten Beobachtungen und kohärente Beschreibungen erst ermöglichen?

6.1 Räumliche Metaphern: Drücke, Temperaturen, Spannungen

Ein wichtiges Bild und tragendes Element in PSS ist das der Niveaus und Niveaudifferenzen. Wasser fließt (von selbst) von höheren zu tieferen Lagen, eine Höhendifferenz dient als *Antrieb* für den Vorgang. Die selbe Vorstellung funktioniert in der Elektrizität (elektrische Spannung als Differenz der elektrischen Niveaus, d.h. des elektrischen Potentials), bei thermischen Potentialen (Temperatur als Niveau, Temperaturdifferenz als "thermische Spannung"), in der Chemie (chemische Potentiale und "chemische Spannung") und bei Bewegung (in der Rotationsbewegung ist die Winkelgeschwindigkeit das Rotationspotential). Die verwendete Metapher ist eine räumliche, die die Begriffe *oben und unten* (hoch und tief) verwendet (z.B. *warm ist oben* oder hoch).

Wir machen hier offensichtlich von der mythischen Vorstellung von Polaritäten Gebrauch: warm und kalt, stark und schwach, hoch und tief. Zwischen den Polen besteht eine *Spannung*, und die Natur versucht, diese auszugleichen (wir verwenden das anthropomorphe Bild *die Wasserniveaus in den Behältern wollen sich angleichen*; siehe auch Egan, 1988, und Fuchs, 2004).

Wie erwähnt, betrachten wir Niveaudifferenzen als *Antriebe* von Prozessen (fließen und entstehen). Zu Antrieben gehören als Gegenpol *Widerstände*. Prozesse laufen nicht in jedem Fall ab, und sie laufen nicht gleich leicht oder schnell ab. Die Grösse, die den Prozess reguliert, kann man Widerstand nennen.

Niveaudifferenzen sind Antriebe für Vorgänge bedeutet, dass wir eine Art von Kausalität mit diesen Grössen verbinden. Sie als *Spannungen* zu bezeichnen fügt ein menschliches Element zu unseren Vorstellungen über natürliche Vorgänge. Wir kennen diese Vorstellung als Teil des mythischen Denkens über den Ausgleich zwischen Polaritäten (Egan, 1988).

6.2 Ontologische Metaphern: Stoffe, Wärme, Elektrizität, Drall und Schwung

Unsere Vorstellungen von der Materialität der Welt und der Prozesse, von Objekten, Substanzen und Entitäten kommt klar zum Vorschein. Wir stellen uns Wasser, Luft, Wärme, Elektrizität und möglicherweise auch Drall und Schwung als Substanzen vor. *Wärme ist eine Substanz* wäre dann die zuunterst liegende ontologische Metapher zum Verständnis thermischer Prozesse. *Der Kaffee enthält viel Wärme* oder *ich habe mich am Teppich nur wenig (elektrisch) aufgeladen* sind Beispiele von Folgerungen aus den entsprechenden Metaphern.

Die Erfahrung mit bestimmten Stoffen (Wasser und Luft) erlaubt den Aufbau von strukturellen Metaphern: *Wärme, Elektrizität, Drall und Schwung sind Fluide*. Aussagen wie *Wärme fließt aus dem heissen Kaffee*, oder *Wenn ich die Türklinke anfasse, dann entlade ich mich*, oder *Durch das Feuer ist viel Wärme entstanden* sind Beispiele für mögliche Implikationen, die auf dieser Metapher beruhen.

Genau wie die Niveaudifferenzen oder Spannungen, so haben auch die Mengengrössen eine Bedeutung für unsere Vorstellung der Kausalität bei physikalischen Prozessen. Es scheint mir, dass wir uns die Substanzgrössen leicht auch als die Agenten und Patienten unserer Erfahrung der direkten Verursachung (Abschnitt 2.3) vorstellen können (siehe Abschnitt 6.3). Aussagen wie *das Wasser treibt das Mühlrad an, mit Elektrizität machen wir die Herdplatte heiss* oder *Umwandlungen chemischer Stoffe führen zu elektrischem Strom* sind Zeugen dafür.

Für die Substanzen oder Mengengrössen gibt es Behälter (irgendwelche Körper oder Stoffe), d.h. die Substanzen können gespeichert werden. Die Urerfahrung, dass mehr Flüssigkeit in einem Behälter dazu führt, dass das Niveau steigt (*mehr bedeutet rauf*), wird auf die anderen Ty-

pen von Prozessen übertragen. Mehr Bewegungsmenge (Schwung) führt dazu, dass der Körper schneller ist, mehr Wärme macht ihn heisser, mehr Fluid (Wasser, Luft) erhöht den Druck, etc.

Die Vorstellung von Behältern für die Mengengrößen der physikalischen Vorgänge führt in den Naturwissenschaften und der Technik zu einem präzisen, engen aber wichtigen Systembegriff. Ein physikalisches *System* ist irgendein Körper oder irgendein Raumgebiet, in dem physikalische Mengengrößen (Fluide, chemische Stoffe, Drall, Wärme) enthalten sind. Aufgabe der Systemanalyse ist es, herauszufinden, auf welchen Wegen diese Größen in die Systeme hinein oder aus ihnen heraus gelangen, oder wie sie in ihnen entstehen oder vergehen.

Ich denke mir, dass die physikalischen Mengengrößen viel mit den vier Elementen *Erde, Wasser, Luft und Feuer* der antiken Naturvorstellung zu tun haben (zu den Elementen siehe den Ausschnitt “Die Kosmologie des Timaios” aus Ekschmitt, 1989). Die vier Elemente sind sicher nicht mit unseren modernen chemischen Elementen (Wasserstoff, Helium, Eisen, Kalium, Gold, Uran...) zu vergleichen. Sie haben eher die Bedeutung von Prozesselementen, d.h. sie sind die körperlichen oder substanziellen *Objekte*, die mit den wesentlichen Prozessen in dieser Welt verbunden sind. Genauso können wir uns die Rolle der Mengengrößen (Elektrizität, Wärme, etc.) vorstellen.

6.3 Stoffe, Wärme, Elektrizität, Drall und Schwung als Agenten: Die Rolle der Energie

Wir haben gesehen, dass die Erfahrung der Kopplung von Prozessen in Maschinen und in ganzen Ablaufketten in Natur und Technik nach einer neuen Größe verlangt: Energie. Wenn wir sagen, *Wasser, Wärme oder Elektrizität sind Akteure oder Agenten*, dann drücken wir eine Metapher aus, die sehr weitreichend ist. Mit der Idee von Agenten verwenden wir nicht nur Vorstellungen über einfache, direkte Kausalität (*der Motor dreht wegen der Elektrizität*). Wir erweitern das Bild und glauben auch—in einem romantischen Sinn—dass es etwas gibt, das bei allen Wandlungen in der Natur (aus der Elektrizität folgt eine Drehbewegung) unverändert bleibt. Wenn die Elektrizität arbeitet, um die Drehung anzutreiben, so erklären wir das bildlich, indem wir sagen, die Elektrizität gebe Energie ab, die dann von der Drehbewegung weiter genutzt wird. Ketten von Vorgängen machen klar, dass Energie durch die Kette fließt. Damit erzeugen wir die Metapher *Energie ist ein Fluid*, mit allen seinen möglichen Folgen (zu denen durchaus auch falsche Schlussfolgerungen gehören können⁹).

Energie und Kausalität. Die Beschreibung der Rolle der Energie, die ich hier gegeben habe, deutet auf die Verbindung unserer Vorstellungen von Kausalität und Energie hin. Das selbe gilt für die Beschreibung des Kerns des Konzepts der Kausalität von Lakoff und Johnson (siehe Abschnitt 2.3). Wenn man sich dann noch die Verknüpfung des Kerns von Kausalität mit dem Prinzip der Verwandlung (Umwandlung) vor Augen führt, so versteht man vielleicht, warum in traditionellen Darstellungen von Physik, Technik, Chemie und Biologie immer von Energieumwandlung die Rede ist (beachten Sie, dass in PSS nur eine einzige Größe Energie vorkommt, von Energieumwandlung also nicht gesprochen wird). Basierend auf unserem metaphorischen Verständnis von Prozessen scheinen wir zwei Möglichkeiten zu haben, über Energie zu sprechen:

- einmal als eine Größe, die von Agenten (Fluide, Wärme, Elektrizität...) abgegeben und von Patienten (Fluide, Wärme, Elektrizität...) empfangen wird (siehe die Beschreibung des Kerns des Konzepts von Kausalität in Abschnitt 2.3),
- oder aber als Stellvertreterin für die Agenten und Patienten, die “in anderer Form” aus sich selbst hervorgeht oder in sich selber übergeht.

Im zweiten Fall konstruieren wir offensichtlich Metaphern wie *Wärme ist Energie* oder *Elektrizität ist Energie*. (Man fragt sich, warum wir das nicht mit Fluiden tun? Vermutlich, weil wir dann schnell merken würden, dass die Idee nicht kohärent ist.) Die Beobachtung, dass auf einen Prozess ein anderer folgt, führt auf die Idee, dass sich die Stellvertreterin von Agent und Patient verwandelt hat. Agent und Patient haben übrigens bei dieser Darstellung physikalischer Prozesse ihre Bedeutung verloren, sie werden kaum mehr wahrgenommen.

Natürlich kommt die Vorstellung von Kausalität in PSS schon lange vor der Notwendigkeit der Einführung des Energiebegriffs zum Zug. Das ist im Zusammenhang mit Niveaudifferenzen als Antriebe für Prozesse des Fließens offensichtlich. In PSS ist diese Vorstellung von Kausalität nahe am Kern der direkten Verursachung, und der Energiebegriff hängt auf metaphorische Art mit der Vorstellung von Antrieben zusammen.

Energie und Romantik. Die Energie und die sie unterstützenden Metaphern haben viel mit romantischem Verstehen zu tun. Es ist kaum ein Zufall, dass der Energiebegriff etwa während der Zeit der Romantik (sehr grob datiert zwischen 1750 und 1850) seinen Weg in die Physik gefunden hat. Es ist auch kaum ein Zufall, dass die Romantik mit dem Zeitalter der industriellen Revolution zusammenfällt. Zuerst denkt man vielleicht an einen Widerspruch: die Romantiker haben die Industrialisierung bekämpft. Das stimmt, offenbart aber nicht den Kern des Zusammenhangs. Romantisches Verstehen (Egan, 1990; Fuchs, 2004) eröffnet uns den Blick für die ganze Natur, für die ganze Wirklichkeit. Die Entwicklung der Physik vor dieser Epoche (etwa von 1600 bis 1750) ist durch den Aufbau der Mechanik und die Vorstellung, die Welt sei ein grosses Räderwerk, geprägt. Elektrizität, Magnetismus und Thermodynamik, Chemie und Biologie als eigenständige Gebiete, die erst zusammen mit der Mechanik die Reichhaltigkeit der Welt zeigen, gab es vor der Romantik und der industriellen Revolution nicht. Wenn wir die Industrialisierung als Anwendung der Regeln der Mechanik interpretieren, so greifen wir wieder viel zu kurz. Es war die Eröffnung neuer Gebiete, speziell der thermischen Prozesse als Antrieb für Bewegung, die das neue Zeitalter ermöglichten. Die Erforschung der Elektrizität und des Magnetismus und ihr späterer Einbezug in die Industrialisierung gehören genauso in die romantische Periode, oder sind direkte Folgen des romantischen Denkens. Elektrizität und Magnetismus haben die Vorstellungskraft der Romantiker in vorher nicht dagewesener Intensität beflügelt.

Wir können all das im Sinne von PSS als die Erkenntnis über die Verknüpfung der Prozesse in der Natur auffassen. Es gibt freiwillige und unfreiwillige Vorgänge, die freiwilligen treiben die unfreiwilligen an, die freiwilligen setzen Energie frei, die von den unfreiwilligen aufgenommen wird. So entstehen Ketten von Vorgängen, bei denen die Energie unverändert durch die Systeme geht. Falls die Natur eine grosse Maschine ist, dann sicher nicht eine mechanische. Sie ist eher ein "Mechanismus" im modernen verallgemeinerten Sinn eines *Systems*, wie wir das in den Systemwissenschaften verstehen.

6.4 Die Metapher des Wasserfalls

Die alltäglichen Erfahrungen und ihre Interpretation in PSS suggerieren die Metapher *ein Prozess ist ein Wasserfall*. Daraus ergeben sich konkrete metaphorische (und formale) Konsequenzen:

- bei physikalischen Prozessen kommen Niveaus (Potentiale) vor
- Niveaudifferenzen dienen als Antrieb für einen Prozess
- im Wasserfall stürzen Mengengrößen herab

- von selber fließen die Mengengrößen vom höheren zum tieferen Niveau
- die im Wasserfall herabfließende Größe gibt Energie ab
- mit der freigesetzten Energie kann der Wasserfall einen anderen Prozess antreiben

Offensichtlich ist die Metapher des Wasserfalls eine strukturelle: ein Konzept mit einem Bündel von Eigenschaften, die selber auf einfacheren Metaphern beruhen, wird zur Erklärung eines neuen Konzeptes herangezogen.

Visuelle Metaphern. Spätestens die Metapher des Wasserfalls für physikalische Prozesse sollte uns auf die Frage führen, ob es sich dabei eindeutig um eine visuelle Metapher handelt (Abschnitt 2.4) und wenn ja, welche Bedeutung für das Verständnis der Physik damit verbunden ist. Ausser in PSS ist mir nur ein Beispiel für die Benutzung der Wasserfall-Metapher bekannt. Es handelt sich dabei um die Abhandlung über Thermodynamik von Sadi Carnot (1824). Er bespricht sie am Anfang des Buches (in Worten) und macht dann bei den folgenden Überlegungen ständig davon Gebrauch. Ob Carnot die Metapher konstruiert hat, oder ob sie in seiner Kultur ganz geläufig war—vielleicht durchaus im Sinne einer visuellen Metapher—ist mir nicht bekannt.

6.5 Analogien in PSS

Analogien sind, wie in Abschnitt 2.1 erklärt, eine Form von Vergleich. Bei Analogien wird die Struktur eines Wissensgebietes auf ein anderes Gebiet abgebildet, und im Allgemeinen ist die Abbildung umkehrbar. Das konkrete—auch formale—Wissen eines Gebietes ist auf ein anderes Gebiet anwendbar.

Wenn wir ein Gebiet—in unserem Fall die einfache Physik von fluiden Stoffen—aufbauend auf unseren Metaphern konkretisieren und formalisieren, dann kann es als Quelle einer Analogie für einen anderen Phänomenbereich (z.B. Elektrizität oder Wärme) dienen. Konkretisieren und Formalisieren heisst, dass wir formale und quantitative Beziehungen konstruieren, die unserer Meinung nach beobachtete Muster widerspiegeln. Zu diesen Beziehungen gehören Bilanzen, Flussgesetze, kapazitive Gesetze und andere. Wenn wir dann sagen, *Elektrizität verhält sich, als ob es sich um Wasser handelte*, so drücken wir eine Analogie aus. Das bedeutet, dass wir im Zielgebiet (Elektrizität) strukturgleiche oder strukturähnliche Beziehungen annehmen. Ausgehend von einer Anzahl konkreter Entsprechungen können andere postuliert werden. Falls man zum Beispiel beobachtet, dass ein Wasserstrom nicht urplötzlich angestellt werden kann, so könnte man vermuten, dass etwas Ähnliches in der Elektrizität auch vorkommt. Das ist tatsächlich der Fall: das Phänomen der Induktion kommt sowohl bei Wasser als auch bei Elektrizität vor. Wenn man dann aber versucht, die gleiche Analogie (die der Induktion) auf die Wärme zu übertragen, so wird man enttäuscht. Im Alltag kommt ein solches Phänomen in der Thermodynamik nicht vor. Allerdings, wenn man weiter schaut, so taucht es doch auf. Bei ganz niedrigen Temperaturen gibt es Vorgänge, die man analog zum Phänomen der Induktion bei Fluiden oder Elektrizität erklärt.

Eine wichtige Analogie, die wir im nächsten Aufsatz verwenden werden (Fuchs, 2004b), ist die folgende. Wir wissen, dass Wärme entsteht, wenn Wasser durch einen Schlauch fließt. Je enger und je länger der Schlauch ist, um so mehr Wärme wird entstehen. Wir wissen aus direkter Erfahrung, dass Wärme auch dann produziert wird, wenn Elektrizität fließt, oder wenn Drall von einem rotierenden Rad durch die bremsende Hand abfließt. Aber was ist, wenn Wärme durch eine Hauswand fließt? Falls die Analogie in dieser Beziehung tragfähig ist, so heisst das, dass

auch hier noch Wärme entsteht. Kann das stimmen?

In gewissen konkreten Fällen sind Analogien in der Physik ein wichtiges und gut ausgebautes Werkzeug.¹⁰ Je formaler die Analogie ist, desto direkter und sicherer darf sie genutzt werden, aber um so weniger kreativ ist sie. Weniger stark ausgebaute Analogien erweisen sich oft als flexibel und darum als Quelle von kreativen Gedanken. Wenn man lernt, mit den Gefahren der Übertragung von Analogien umzugehen, so hält man ein starkes Werkzeug in den Händen.

Warum sehen wir überhaupt die Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Gebieten, auf denen wir dann Analogien aufbauen? Ich habe diese Frage eingangs schon gestellt und beobachtet, dass in der Physik Ähnlichkeiten als primär erscheinen. Wenn wir uns nun aber die Diskussion in diesem Kapitel vor Augen halten, so sehen wir, dass zur Wahrnehmung von Ähnlichkeiten auch hier eine Reihe von wirklich primären Metaphern gebraucht werden. Die graphische Übereinstimmung von Messkurven beim Ausgleich hydraulischer, elektrischer oder thermische Niveaus (Abschnitt 3.2) ist ein Ergebnis unserer Darstellungsweise. Diese beruht auf Interpretationen wie *heisser ist höher* oder *elektrisch stärker ist höher*.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Abgesehen von einer kurzen Darstellung der Physik als Systemwissenschaft (PSS) bringt dieser Aufsatz einen neuen Aspekt in die Diskussion: eine Beschreibung von Metaphern und der metaphorischen Struktur von PSS, und eine Einbettung dieser Elemente in ursprüngliche mythische und romantische Verstehensformen. Die Beschreibung der Bedeutung der verschiedenen Denk- und Handlungsformen in der Gestalt des Viererzyklus wurde im vorhergehenden Aufsatz unternommen (Fuchs, 2004). Der Wunsch, der hinter dieser Untersuchung steckt, ist, Aspekte der Physik und der Naturwissenschaften im Gewande der Systemwissenschaft einem breiteren Publikum in neuer Gestalt erscheinen zu lassen.

Physik als Systemwissenschaft ist relativ neu. Wenn PSS “korrekt” sein soll, so muss dieser Ansatz die gleichen formalen Resultate liefern, wie die traditionelle Darstellung (TP). Wenn sie das tut, ist sie dann neu? Braucht man sie überhaupt? Aus der Sicht der Bedeutung von Metaphern ist PSS tatsächlich anders als TP, gleichzeitig aber auch “korrekt” im klassischen Sinne, da sie—in den Bereichen, die beide Darstellungen abdecken—die gleichen formalen Resultate liefert wie TP. Die Andersartigkeit der Metaphern hat aber zwei Bedeutungen. Einmal ist es möglich, dass bestimmte Personen auf andere Metaphern besser ansprechen und damit eine Wissenschaft besser lernen können. Zweitens eröffnet PSS als Systemwissenschaft auch zusätzliche Aspekte, die in TP nicht enthalten sind. Der romantische Unterbau der Systemwissenschaft öffnet unseren Blick auf komplexere Zusammenhänge und Systeme, z.B. in den Umweltwissenschaften. Und schliesslich hat PSS—durch die starke Betonung von dynamischen Prozessen—zum Aufbau einer dynamischen Theorie der Wärme beigetragen.

Die Untersuchung der Bedeutung von Metaphern und Analogien in Naturwissenschaften im Allgemeinen und der Physik im speziellen ist nicht neu (Gentner, 1983; Ortony, 1993; Gentner et al., 1997; Gentner and Markman, 1997; Gentner et al., 2001; Kuehne and Forbus, 2002). Abgesehen von einigen Beispielen ist es aber nicht klar, was man mit dem Wissen um metaphorische und analogische Strukturen beim Lernen und Lehren anfangen soll. PSS ist ein Beispiel einer naturwissenschaftlichen Theorie, die sowohl formal ist als auch sehr direkt und ausgiebig von metaphorischen und analogischen Strukturen Gebrauch macht. Vielleicht führt sie im Zusammenhang mit Untersuchungen in Didaktik, kognitiver und allgemeiner Psychologie, Wis-

senschaftsgeschichte, Linguistik und Artificial Intelligence zu einer Klärung der Bedeutung von Metaphern und Analogien für das Lernen und Verstehen. Allerdings möchte ich hier eine Warnung anbringen. Formale Zusammenhänge durch Metaphern zu untermauern ist sicher gut und notwendig. Aber man sollte sich nicht zu viel erhoffen, wenn man das Lernen einer Wissenschaft nicht gleichzeitig durch andere Aspekte verallgemeinert. Der Vierer-Zyklus ist eine Metapher dafür, wie das geschehen könnte.

Das Buch von Lakoff und Johnson hat einen Aspekt in die Diskussion um Metaphern, und damit um unser Verstehen, gebracht, der für das Lernen von Physik sehr interessant sein kann. Sie betonen, dass primäre Metaphern körperlich fundiert sind (Lakoff and Johnson, 1999). Inzwischen ist diese These durch neurale Modelle untermauert worden (Lakoff and Johnson, 1980, Afterword, 2003). Da sich die Physik ganz besonders mit der physischen Welt auseinandersetzt, und da primäre Metaphern auf Vorstellungen von räumlicher Orientierung, Objekten und Substanzen beruhen, scheint eine fruchtbare Überschneidung zu existieren. Der Nutzen dieser Ähnlichkeit sollte weiter untersucht werden.

Diese Arbeit lässt viele Fragen offen. Die Darstellung der Physik in PSS hat sich in den letzten 20 Jahren zwar konsolidiert, aber die Fragen nach mythischen, romantischen und metaphorischen Strukturen ist noch wenig erforscht. Es ist interessant zu sehen, in welchem Masse Psychologie und Linguistik auch in einem naturwissenschaftlichen Gebiet an Bedeutung gewinnen, wenn man sich Fragen stellt, die über den formalen Inhalt der Wissenschaft hinausgehen.

Anmerkungen

- 1 Ende der 50-Jahre des 20. Jahrhunderts wurde der einführende Physikunterricht für Naturwissenschaften und Technik an Universitäten in den USA neu aufgebaut. Was damals entstand, hat sich zu einer nun schon vierzigjährigen Tradition entwickelt. Das erste Lehrbuch, das diesen Trend setzte, ist das von David Halliday und Robert Resnick. Die Bilder und Metaphern sind die, die wir uns von der Physik gewöhnt sind. Sie beruhen im wesentlichen auf der Mechanik (noch spezieller: auf der reibungsfreien Bewegung), ergänzt durch atomistische Vorstellungen. Übertrieben gesagt stellt man sich vor, dass alle Vorgänge irgendwie das Resultat der Bewegung kleiner Teilchen sind. (Das ist wirklich übertrieben, und ich tue der TP damit zum Teil Unrecht. Aber zumindest in vielen Lehrbüchern kriegt man genau diesen Eindruck.)
- 2 Es gibt viele Wurzeln von PSS. (1) Die verallgemeinerte Darstellung der klassischen Physik (der Physik der makroskopischen Welt, wo man sich nicht um Moleküle, Atome und Elementarteilchen kümmert); man nennt das Kontinuumsphysik (Eringen, 1971-1976; Truesdell C. A. and R. A. Toupin, 1960; Truesdell C. A. and W. Noll, 1965). (2) Technik, insbesondere Regeltechnik und Systemtechnik. (3) Allgemeine Systemtheorie und Kybernetik N. Wiener, 1948). (4) Didaktik der Physik von Falk und Herrmann an der Universität Karlsruhe (Falk G. und F. Herrmann, 1978-1982). (5) Systemdynamik und systemdynamisches Modellieren (Forrester, 1961, 1968, 1969; Stella). (6) Moderne Thermodynamik (Müller, 1985; Fuchs, 1996). (7) Didaktik der Physik an der ZHW (Maurer, 1992; Fuchs, 1996-2002).
- 3 Da PSS unter anderem auf der Kontinuumsphysik aufgebaut wurde, wurden bisher viele Gebiete der Physik des Mikrokosmos nicht aufgearbeitet. Auf der anderen Seite gibt es besonders in der Thermodynamik ein neues Feld, das in TP nicht behandelt wird, nämlich die Darstellung von dynamischen thermischen Vorgängen (siehe Fuchs, 1996).
- 4 Seit mehr als 20 Jahren wird intensiv untersucht, was Lernende von Physik wissen, und was sie verstehen. Unverständnis und Fehler sind weit verbreitet. Man hat als Ursache sogenannte "Fehlvorstellungen" (misconceptions) ausgemacht, die in unseren Alltagsvorstellungen begründet sein sollen (siehe z.B. Novak, 1987). Es wird zwar wenig über Metaphern gesprochen, aber es ist klar, dass die "Fehlvorstellungen" mit metaphorischen Vorstellungen zusammenhängen müssen. Wenn die metaphorische Struktur der Physik (d.h. von TP) ziemlich anderes ist als die unserer Alltagsvorstellungen, dann kann das zu schweren Konflikten für die Lernenden führen. Ich bin überzeugt, dass die metaphorische Struktur von PSS mehr mit unseren Alltagsvorstellungen zu tun hat.
- 5 Im Laufe der Geschichte haben sich Vorstellungen über das Wesen und die Bedeutung von Metaphern stark gewandelt. Von fast vollständiger Ablehnung (Plato) bis zu der modernen Vorstellung von Lakoff und Johnson, die sagen, dass wir mit Metaphern denken, war es ein langer Weg. Verschiedene Metaphern-Theorien werden bei Caviola (2003, pp.14-18) kurz dargestellt.
- 6 Gestalt-Theorie: <http://www.gestalttheory.net/gth/>
- 7 Hier scheint eine Ähnlichkeit mit dem Vierer-Zyklus (Fuchs, 2004) vorzuliegen. Das stimmt nicht nur in Bezug auf die Zahl Vier, sondern auch auf die Art, wie man sich spontan im Vierer-Zyklus bewegt, wenn man konkret an einem Problem arbeitet.
- 8 Die Welt, die sich da auftut, ist die des Fließens von Fluiden, der Ausbreitung von Wärme, Elektrizität und Stoffen (zum Beispiel im Körper von Pflanzen und Tieren), und einfache, reibungsbehaftete Bewegungen (Rotation und Translation). Mit einer einzigen zusätzlichen Beziehung, die aus der Beobachtung des Anfahrens und Stoppens von Strömen kommt, kriegt man alle Schwingungsvorgänge mit dazu.
- 9 Energie kann man speichern, und sie kann fließen. So weit sieht sie wie die normalen mengenartigen Größen (Fluide, Wärme oder Elektrizität). Die zusätzliche Eigenschaft, dass sie in Prozessen abgegeben und aufgenommen werden kann, unterscheidet sie aber von diesen. Formal darf man mit der Energie dann auch nicht in jedem Fall so umgehen, wie mit den anderen Größen (wie man in der Physik sagt, sie hat andere Transformationseigenschaften beim Übergang von einem Bezugssystem in ein anderes).
- 10 Auch in TP, die weniger von Analogien Gebrauch macht als PSS, gibt es einige Vergleiche, die oft gezogen werden. Vergleiche zwischen elektrischen Stromkreisen und Wasserstromkreisen, oder Wärmeströmen und elektrischen Strömen, sind weit verbreitet und teilweise stark formalisiert. Man findet z.B. nicht nur in Anfängerbüchern, sondern auch in hochtechnischen Abhandlungen Anleitungen, wie man wärmeleitende Materialien als elektrische Netzwerke darstellen und so konkrete Probleme lösen kann.

Literaturverzeichnis

- Borer T., P. Frommenwiler, H.U. Fuchs, H. Knoll, G. Kopacsy, W. Maurer, E. Schütz, K. Studer, U. Walker (2000): *Physik: Ein systemdynamischer Zugang für die Sekundarstufe II*. Sauerländer, Aarau.
- Burkhardt H. (1987): Systems physics: A uniform approach to the branches of classical physics. *Am.J.Phys.* **55**, 344–350.
- Carnot S. (1824): *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Bachelier, Paris.
- Caviola H. (2003): *In Bildern sprechen. Wie Metaphern unser Denken leiten*. HEP-Verlag, Bern.
- Egan K. (1988): *Primary Understanding. Education in Early Childhood*. Routledge, New York.
- Egan K. (1990): *Romantic Understanding. The Development of Rationality and Imagination, Ages 8-15*. Routledge, New York.
- Ekschmitt W. (1989): *Weltmodelle. Griechische Weltbilder von Thales bis Ptolemäus*. Verlag Philipp von Zabern, Mainz.
- Eringen A. C. (1971-1976): *Continuum Physics*, Vol.I–IV. Academic Press, New York.
- Falk G. and F. Herrmann (1978-1982): *Konzepte eines Zeitgemässen Physikunterrichts*. Heft 1-5. Schroedel Schulbuchverlag, Hannover.
- Falk G., Herrmann F., Schmid G. B. (1983): “Energy forms or energy carriers?” *Am.J.Phys.* **51**(12), 1074-1077.
- Forrester J. (1961): *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Forrester J. (1968): *Principles of Systems*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Forrester J. (1969): *Urban Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Fuchs H. U. (1996): *The Dynamics of Heat*. Springer-Verlag, New York.
- Fuchs H. U. (1996b): Fluids, Electricity, Heat, and Motion. Introduction: Images of Change. Lecture Notes. Zurich University of Applied Sciences at Winterthur, Winterthur.
- Fuchs H. U. (1997): Fluids, Electricity, Heat, and Motion. Chapter 1: The Storage and Flow of Fluids. Lecture Notes. Zurich University of Applied Sciences at Winterthur, Winterthur.
- Fuchs H. U. (1997b): Fluids, Electricity, Heat, and Motion. Chapter 4: The Energy Principle. Lecture Notes. Zurich University of Applied Sciences at Winterthur, Winterthur.
- Fuchs H. U. (1997c): “The Continuum Physics Paradigm in Physics Instruction. I. Images and models of change.” Department of Physics and Mathematics, Zurich University of Applied Sciences at Winterthur, 8401 Winterthur, Switzerland.
- Fuchs H. U. (1998): “The Continuum Physics Paradigm in Physics Instruction. II. System dynamics modeling of physical processes.” Department of Physics and Mathematics, Zurich University of Applied Sciences at Winterthur, 8401 Winterthur, Switzerland.
- Fuchs H. U. (1998b): “The Continuum Physics Paradigm in Physics Instruction. III. Using the Second Law.” Department of Physics and Mathematics, Zurich University of Applied Sciences at Winterthur, 8401 Winterthur, Switzerland.
- Fuchs H. U. (2002): *Modeling of Uniform Dynamical Systems*. Orell Füssli Verlag, Zürich.
- Fuchs H. U. (2004): Metaphern, Vorstellungskraft und Symbole: Fundamente des Fromalen Denkens. Aufsatz aus der Reihe Physik und Evolution, Studiengang FU, Zürcher Hochschule Winterthur, Winterthur.
- Fuchs H. U. (2004b): Mehr als Sie je über Entropie wissen wollten. Aufsatz aus der Reihe Physik und Evolution, Studiengang FU, Zürcher Hochschule Winterthur, Winterthur.
- Fuchs H. U., Ecoffey G., Schütz E. (2003): *Physics as a Systems Science*. Case Study Materials.
- Gentner, D. (1983): Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, **7**, 155-170.
- Gentner D. (1989): The mechanisms of analogical learning. In Vosniadou S., Ortony A. eds.: *Similarity and analogical reasoning* (pp. 199-241). Cambridge University Press, Cambridge.
- Gentner, D., Brem, S., Ferguson, R. W., Markman, A. B., Levidow, B. B., Wolff, P., & Forbus, K. D. (1997). Analogical reasoning and conceptual change: A case study of Johannes Kepler. *The Journal of the Learning Sciences*, **6**(1), 3-40. <http://www.psych.nwu.edu/psych/people/faculty/gentner/allpubs.htm>
- Gentner D., Markman A. B. (1997): Structure mapping in analogy and similarity. *American Psychologist*, **52**, 45-56. <http://www.psych.nwu.edu/psych/people/faculty/gentner/allpubs.htm>
- Gentner D., Bowdle B., Wolff P., Boronat C. (2001): Metaphor is like analogy. In D. Gentner, K. J. Holyoak, &

- B. N. Kokinov (Eds.) (in press). *The analogical mind: Perspectives from cognitive science* (pp. 199-253). Cambridge, MA: MIT Press. <http://www.psych.nwu.edu/psych/people/faculty/gentner/>
- Haliday D., Resnick R., Walker J. (2003): *Fundamentals of Physics*, 6th ed. Wiley and Sons, New York.
- Herrmann F. (1995–2002): *Der Karlsruher Physikkurs. Sekundarstufe I: 3 Bände plus Lehrerband; Sekundarstufe 2: 3 Bände*. Aulis Verlag Deubner, Köln.
- Herrmann F. and Schmid G. B.: "The Poynting vector field and the energy flow within a transformer," *Am.J. Phys.* **54**(6),528-531 (1986).
- International Society of the Systems Sciences: www.isss.org
- Kuehne S. E., Forbus K. D. (2002): Qualitative physics as a component in natural language semantics: A progress report. Proceedings of the 24th Annual Conference of the Cognitive Science Society. Laurence Earlbaum Associates, New Jersey, August, 2002. <http://www.qrg.northwestern.edu/papers/papers.htm>
- Lakoff G. and Johnson M (1980).: *Metaphors We Live By*. University of Chicago Press, Chicago (with a new Afterword, 2003).
- Lakoff G. and Johnson M. (1999): *Philosophy in the Flesh: The Embodied Mind and Its Challenge to Western Thought*. Basic Books.
- Maurer W. (1992): "Kopernikanische Wende in der Physik," *Technische Rundschau* **84** (51),48–52.
- Müller I. (1985): *Thermodynamics*. Pittman, Boston.
- Novak J.D. ed. (1987): *Proceedings of the Second International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics* (Cornell University, Ithaca, New York), Vols. I-III.
- Ortony A. ed. (1993): *Metaphor and thought* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Redish E. F. (2003): *Teaching Physics*. Wiley & Sons, New York.
- Schmid G. B (1982): "Energy and its carriers," *Phys.Educ.* **17**, 212-218.
- Stella: isee systems, Lebanon, NH. (<http://www.hps-inc.com>)
- St. Clair R. N. (2000): Visual Metaphor, Cultural Knowledge, and the New Rhetoric. In Reyhner J., Martin J., Lockard L., and Gilbert W. S., eds.: *Learn in Beauty: Indigenous Education for a New Century*, Chapter 8 (pp. 85-101). Northern Arizona University, Flagstaff, Arizona. pdf file on <http://jan.ucc.nau.edu/~jar/LIB/LIB8.html>.
- Truesdell C. A. and R. A. Toupin (1960): "The Classical Field Theories," in *Encyclopedia of Physics*, v. III/1, S.Flügge ed. Springer-Verlag, Berlin.
- Truesdell C. A. and W. Noll (1965): "The Non-Linear Field Theories of Mechanics," in *Encyclopedia of Physics*, v. III/3, S.Flügge ed. Springer-Verlag, Berlin. L.E.
- Weber K. (2004): Materialien zu "Naturwissenschaft", 4. Semester, Fachjournalismus und Unternehmenskommunikation. Zürcher Hochschule Winterthur.
- Wiener N. (1948): *Cybernetics: Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, 2nd ed., 1965. Cambridge, Massachusetts.

Anhang

A.1 Dissipative Prozesse und reibungsfreie Bewegung

In der Gesellschaft von Physikerinnen und Physikern ist die Meinung weit verbreitet, dass die Griechen zwar grundsätzlich Grosses geleistet haben, dass ihre Vorstellungen über Physik aber doch ziemlich dürftig, um nicht zu sagen falsch, sind. "Aristotelische Vorstellung über Bewegung" ist ein geflügeltes Wort für "falsche Vorstellung". Nach der Meinung von Physikern verfallen fast alle Lernenden—and als Erwachsene fast alle, die nicht Physiker sind—diesen aristotelischen Vorstellungen. Worin bestehen diese? Wie erklären die heutigen Lernenden Bewegungsvorgänge? Und besonders, warum sind Fehlvorstellungen so verbreitet, und sind sie eine unvermeidliche Folge der Natur der Physik?

Ein konkretes Beispiel zeigt einen vermeintlichen Unterschied zwischen aristotelischer und newtonscher Vorstellung von Bewegung. Aristoteles meinte, dass eine Kraft proportional zur Geschwindigkeit ist. Bei Newton lernen wir, dass Kraft proportional zur Beschleunigung des Körpers ist. Da beides gleichzeitig wohl nicht möglich ist, und da Newton Recht hat, muss Aristoteles falsch liegen.

Nun sind beide Aussagen durchaus korrekt. Wir können die des Aristoteles als eine Aussage über ein konkretes Kraftgesetz und die Newtons als Ausdruck des Impulsbilanzgesetzes auffassen. In moderner Sprache spricht die erste von einem konstitutiven Gesetz, die zweite vom Bilanzgesetz für Bewegung. Es braucht beide, um z.B. die Bewegung eines Körpers in einem reibenden Medium zu beschreiben.

Was ist denn die Wurzel der aristotelischen Aussage über eine Kraft? Sie geht vermutlich von der Anschauung von Bewegungen, wie wir sie auf der Erde antreffen, aus. In reibenden Medien (Luft, Wasser, etc.) oder auf Unterlagen ist der Einfluss der Reibung oft von der Geschwindigkeit des Körpers abhängig. Also ist das aristotelische Kraftgesetz eine durchaus vernünftige Formulierung eines konkreten konstitutiven Gesetzes. Sein Ausgangspunkt ist die reibungsbehaftete Bewegung, so wie sie natürlich vorkommt.

Lernende haben die grössten Schwierigkeiten, Physik im Allgemeinen, und Mechanik im Speziellen, zu verstehen (Novak, 1987). Sie können Kräfte nicht richtig identifizieren, und sie meinen, dass es eine Kraft braucht, wenn ein Körper seine Bewegung nicht ändern soll. Da Newtons Formulierung der Mechanik sagt, dass die Kraft auf einen Körper, der seine Bewegung nicht ändert, Null ist, haben wir ein Problem. Wie erwähnt sagen wir, die Lernenden seien in einer aristotelischen Vorstellung stehen geblieben. Dieses Verhalten ist tausendfach dokumentiert worden (siehe z.B. Redish, 2003, pp.56-57), und ich erlebe es jedes Mal, wenn das Thema zur Sprache kommt.

Worauf beruht denn die newtonsche Formulierung der Mechanik? Wir betonen heute die Bedeutung der sogenannten Trägheitsbewegung, des Ideals, das sich einstellen soll, wenn gar keine Kräfte auf einen Körper wirken. Dann soll sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit gleichförmig und für immer bewegen. Wir erzählen die Geschichte, wie Galilei das Trägheitsprinzip in der Kirche bei der Betrachtung der Schwingungsbewegung einer Lampe entdeckt haben soll. Ihm sei plötzlich klar geworden, dass diese Bewegung immer so weiter gehen könnte, wenn die Lampe nicht unter äusserem Einfluss stünde. Das Fundamentale sei also die immerwährende Bewegung, und nicht die, die früher oder später zu einem Ende kommt. Da das Absterben einer Bewegung durch Reibung verursacht wird, heisst immerwährende Bewegung reibungsfreie Bewegung. Und da Reibung Wärme produziert, bedeutet Trägheitsbewegung dis-

sipationsfreie Bewegung. Newton gelang als Erstem eine moderne Theorie einer dissipationslosen Bewegung (Planetenbewegung nur unter dem Einfluss der Gravitation, die keine Wärme erzeugt). Das mag dazu beigetragen haben, dass heute der Prototyp eines physikalischen Vorganges der der reibungsfreien Bewegung ist.

Wie gesagt, die natürliche Bewegung auf der Erde ist eine, die immer wieder angestossen werden muss, und die von selbst immer wieder zu Ende geht. Die Griechen erfanden das fünfte Element, um die ewig währende Bewegung der Gestirne zu erklären. Schliesslich war die Welt aus Erde, Wasser, Luft und Feuer die, in der Bewegung nicht ewig sein konnte.

Erstaunt es, dass wir Schwierigkeiten mit reibungsfreier Bewegung haben, dass wir Schwierigkeiten mit einer Physik haben, die auf reibungsfreier Bewegung aufbaut? Eine unserer Alltagsvorstellungen ist die des Angleichs verschiedener Niveaus wie bei kommunizierenden Gefässen. Für Bewegung heisst das, dass sich die Geschwindigkeiten von Körpern, die in Wechselwirkung miteinander stehen, angleichen. Da die Erde der dominierende Körper in unserer Umgebung ist, gleichen sich alle Geschwindigkeiten von selbst derjenigen der Erde an. Mit anderen Worten, Körper kommen ganz natürlich auf der Erde zur Ruhe.

Unsere Grundvorstellung ist mit anderen Worten die von dissipativen (d.h. Wärme produzierenden) Prozessen. Wir haben in den Abschnitten 3-5 gesehen, dass sich Physik auf solchen Beispielen aufbauen lässt. Wir brauchen reibungsfreie Bewegung nicht, um den Rest der Welt zu verstehen.

Heisst das nun aber, dass die Mechanik eine Ausgestossene unter den Theorien dissipativer Prozesse wird? Nein, das heisst es nicht. Das kleine Beispiel des Angleichs von zwei Rotationsbewegungen in Tabelle 1 zeigt, dass man Mechanik genau so verstehen kann wie z.B. die Physik der Fluide oder der Wärme. Wir bauen dann auf ganz natürliche Weise von Anfang an Modelle reibungsbehafteter Bewegungsvorgänge, bei denen Wärme entsteht. Eine Schwingung kommt in unseren Modellen wie in der Natur von selbst zur Ruhe. Tatsächlich ist die reibungsfreie Bewegung eine kuriose Ausnahme in unseren Modellen—und nur in unseren Modellen—wenn wir dort den Einfluss der Reibung gleich Null setzen.

Ich möchte das Thema Bewegung, Reibung und Wärme von einem weiteren Punkt aus betrachten. Was ich hier gesagt habe, suggeriert, dass die Entwicklung der Mechanik und damit der Physik nicht so hätte laufen müssen, wie sie tatsächlich vor sich ging. Da wird sich bei den meisten Physikern Widerspruch regen. Die Entwicklung musste so gehen, weil die Natur so ist, und weil wir schliesslich die objektive Wahrheit über die Natur in der Physik festhalten. Wir akzeptieren darum auch, dass die später entstandene Wärmelehre nichts mit Dynamik zu tun haben kann. Es existiert eine vollkommene—objektiv in der Natur existierende—Spaltung zwischen reibungsfreier Bewegung und den Wärmephänomenen. Das Studium der Bewegung führt zu einem Beispiel einer Theorie der Dynamik, während Thermodynamik eine Theorie der Statik sein muss. Nach der gängigen Vorstellung kann es in der Wärmelehre nur darum gehen, herauszufinden, wie die Zustände am Ende aller Vorgänge sind, dann nämlich, wenn sich die Niveaus angeglichen haben. Das heisst, in TP nimmt man an, dass eine Theorie, die sich mit dissipativen Vorgängen beschäftigt, keine Theorie der Dynamik sein kann. Die Spaltung zwischen dynamischer reibungsfreier Mechanik und statischer dissipativer Thermodynamik ist also das Resultat der natürlichen Ordnung. Wir Menschen mit unserer natürlichen Vorstellung von Ausgleichsprozessen sind leider für die Physik falsch gebaut. Aber man kann schliesslich nicht erwarten, dass die Natur immer alles perfekt macht...

A.2 Physik, Systemwissenschaft und Romantik

Internet-Ressourcen. So ganz direkt findet man wenig Material für Systemwissenschaften und Romantik. Es gibt viel mehr über Wissenschaft und Romantik und etwas zu Romantik und Ökologie. Zwischen den Zeilen spürt man aber Zusammenhänge.

Das Zeitalter der Thermodynamik. Oerstedt und Akustik. <http://www.dal.ca/~nassr99/2d.html>

Biologie. <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/294/5549/2101>

Schlegel und Philosophie. <http://www.fordham.edu/halsall/mod/schlegel-romanticism.html>

Bilder der Wissenschaft. <http://www.autodidactproject.org/other/aant2.html>

Deutsche Naturphilosophie. <http://www.aicgs.org/resources/daad/1994021.shtml>

Komplexität. <http://www.physik.uni-bielefeld.de/complexity/index.html>

Chaos. http://www.mathbook.com/c/Chaos_Theory/index1.htm

Romantik und Ökologie. <http://www.rc.umd.edu/praxis/ecology/toc.html>

Romantic Natural History. <http://www.dickinson.edu/~nicholsa/Romnat/>

Sustainability and back to nature. <http://sustsci.harvard.edu/questions/limits.htm>

Science and fiction. <http://www.erudit.org/revue/ron/2001/v/n21/005964ar.html>

International Systems Science Society. <http://www.iss.org/>

Earth systems. <http://www.usra.edu/esse/essonline/>; <http://www.essc.psu.edu/>

Cybernetics and systems science. <http://pespmc1.vub.ac.be/CYBSWHAT.html>

Shelly and ecology. <http://www.erudit.org/revue/ron/1999/v/n16/005885ar.html>

Romanticism. <http://www.ron.umontreal.ca/index.shtml>

Modellbegriff. http://www.muellerscience.com/Pages/GeschichtedesModelldenkens1978-79_page3.htm

A.3 Beispiele von Metaphern und metaphorischen Strukturen

Wichtige Abschnitte aus Lakoff and Johnson (1980).

pp. 15-17, 26-28, 30-32, Chapter 10 (more examples), Chapter 12-13 (Grounding), Chapter 14 (Causation), Chapter 15 (Structuring of experience), Chapter 22 (Similarity).

Internet resources.

Mythos und Metaphern. <http://www.mythosandlogos.com/mythandmetaphor.html>

Metaphor and artificial intelligence. <http://www.compapp.dcu.ie/~tonyv/>

Analogie und Metapher. <http://members.ozemail.com.au/~ddiamond/analog.html>; <http://cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/analogy.html>; <http://www.cs.may.ie/~dod/references.html>; <http://uts.cc.utexas.edu/~best/html/learning/metaphor.htm>; <http://www.uweb.ucsb.edu/~eschniter/manuscripts/METAPHOR.HTM>

Darwin and evolution. <http://www.talkorigins.org/faqs/metaphors/>

Newues denken. <http://www.ptproject.ilstu.edu/metadef.htm>

Linking thinking. <http://www.nexus.edu.au/teachstud/gat/forster1.htm>

Analogical mapping. <http://www.cs.may.ie/~dod/analogy.html>

Metaphor in science. Literature. <http://www.csc.liv.ac.uk/~rcp/metaphor.html>