

Mechanik anders greifen

Physik als Mathematik oder als Erfahrungswissenschaft?

Florian Theilmann

Die Mechanik spielt für die Physik eine gar nicht zu überschätzende Rolle: Sie ist Ausgangspunkt, methodischer Präzedenzfall, Bewährungsprobe und zuletzt Höhepunkt in einem. In der Oberstufe an Waldorfschulen wird sie in der 10. Klasse behandelt. Wie kann die Praxis des Mechanikunterrichts aussehen, wie betreibt man sachgemäß Mechanik? Ich will in diesem Beitrag der Frage nachgehen, wie man aus der Sache heraus zu physikalischen Begriffen kommen kann. Mein Ziel sind allerdings nicht eine Musterepoche und alles erledigende Erklärungen – Physik ist ein Abenteuer, das man selbst erleben, ein Schatz, den man selber heben muss.

Was ist typisch Mechanik?

Nimmt man ein typisches Lehrbuch über Mechanik für Physikstudenten zur Hand, so wird man als unbefangener Beobachter nicht unbedingt den Eindruck haben, es ginge da um Naturwissenschaft, sondern es scheint (wie auch in anderen Gebieten der Physik) um *Mathematik* zu gehen. Vielleicht ist das in der Schule oft auch nicht anders: In der vielleicht bedeutendsten deutschsprachigen Fachzeitschrift für naturwissenschaftlichen Unterricht fand ich eine Studie,¹ in der die Autoren bemerken, dass die Schüler die gelernten Grundsätze der Mechanik, also z.B. das erste Newtonsche Gesetz (das Trägheitsgesetz, vgl. Abschnitt »Gewicht zwischen Aufprallen und Abstoßen«), alarmierend schnell vergessen. Bei allem Mitgefühl für die Lehrer (das Problem kenne ich natürlich auch) – ich kann mir andererseits gut ausmalen, wie die Schüler jeden Morgen auf dem Fahrrad eben sehr gut merken, dass es doch Anstrengung kostet, eine gleichförmige Bewegung aufrecht zu erhalten. Es ist den Kindern eigentlich nicht zu verdenken, dass ihnen *dies* mehr Eindruck macht als die Theorie, die die Lehrer so wichtig finden. Ein abstrakt-mathematischer Ausgangspunkt des Unterrichts entspricht offenbar nicht dem, wie es in der Welt zugeht. Die Mechanik im Unterricht war insofern nicht wirklich Naturwissenschaft.

Nun ist es tatsächlich auch eine bedenkenswerte Frage, inwieweit Mechanik

1 Heuer et al. in MNU 50/5 (1997), S. 280-285

Naturwissenschaft ist. Etymologisch betrachtet bedeutet »Mechanik« so etwas wie »Lehre vom Beweglichen« – unser Alltagswort »Maschine« kommt von der Latinisierung des griechischen »mechane«, das »Vorrichtung«, »List« oder auch »rettenden Einfall« bedeuten kann. Herrmann von Baravalles klassisches Lehrbuch zur Mechanik nimmt als Ausgangspunkt das Interesse an der umgebenden Maschinenwelt, das Verstehen-Wollen gegenüber dem Mechanismus.²

Der Kontrast zwischen einem solchen Ansatz und dem mathematischen Interesse, mit seinem Reichtum an ausgeklügelten (differenzial-)geometrischen und anderen Methoden, ist einerseits deutlich, andererseits gibt es eine grundsätzliche Gemeinsamkeit. Der offenbare Gegensatz ist der, dass es bei von Baravalle in erster Linie um Anschaulichkeit geht und deshalb in seinem Lehrbuch auch viele schöne Skizzen und Beschreibungen zu finden sind. Im Wesentlichen werden eigentlich nur Ausdrücke *ausgerechnet*, nicht aber das Mathematische selbst zum Gegenstand der Betrachtung gemacht. Andererseits: Zum einen erklärt (und interessiert?) auch von Baravalle nicht, wie die Maschinen *wirklich* funktionieren, sondern nur, wie es *im Prinzip* eben geht. Die ganze Materialkunde, die tausenderlei diffizilen Details der Befestigungen, Dichtungen, Schmierung oder Lagerung usw., all das findet sich ebenso wenig wie im mathematischen Lehrbuch – das gilt den Physikern als Ingenieurwissenschaft, nicht als Physik. Und die Gemeinsamkeit: Auch hier wird die Mechanik als Gedankenkonstrukt schon vorgefunden, statt dass sie entwickelt wird. Aber ist nun mechanisch an der Mechanik, nur anschaulich-prinzipiell wissen zu wollen, wie Maschinen oder Vorrichtungen funktionieren? Oder mehr oder weniger ausgeklügelte Berechnungen dazu? Und: Kann das ein Leitfaden für zehnte Klassen sein?

Was hat Gewicht?

Eine andere Art, sich der Mechanik zu nähern, ist der Blick auf die Begriffsbildungen und Konzepte, die sich dort entwickelt haben. Typisch für die Mechanik sind Begriffe wie Gewicht, Kraft, Masse, Energie oder Impuls. Soll man nun, wie in der Mathematik, das Verhältnis dieser vorgefundenen Begriffe beleuchten, oder geht es darum, sie erst zu bilden, indem man die Erscheinungswelt denkend durchdringt? Ich will nicht das eine loben und das andere verdammen, doch scheint es mir wichtig, sich klarzumachen, von welcher Fragestellung man ausgeht.³ Sucht man einen Zugang über Erlebnismöglichkeiten, so wird man bei

2 Herrmann von Baravalle: Physik als reine Phänomenologie, Band I, Bern 1953, oder auch die Neuherausgabe durch Georg Kniebe im Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart 1993. Die Lehrplanangaben für die siebte Klasse der Waldorfschule gehen ebenfalls in diese Richtung, in: E. A. Stockmeyer: Angaben Rudolf Steiners für den Waldorfschulunterricht, Manuskriptdruck, Stuttgart 2001

3 Zum Beispiel geht Günther Ludwig in seiner »Einführung in die Grundlagen der Theoretischen Physik«, Braunschweig 1985, so weit, dass er einen rein axiomatischen Aufbau der Mechanik durchführt.

»Kraft« oder »Gewicht« auf die Idee kommen können, an Körpererfahrungen anzuknüpfen.⁴ Wie ist es aber mit »Energie« oder »Impuls« – wären solche Begriffe dann etwa über seelische Befindlichkeiten zu greifen?

Rudolf Steiner hat die Aufgabe gestellt,⁵ die Naturwissenschaften, insbesondere auch die Physik neu zu gestalten: Die Gegenstände der Mechanik seien dem inneren Erleben eigentlich schon entglitten; es gälte heute, sie mit der Perspektive auf den Gesamtzusammenhang der Wissenschaften mit dem Menschen neu und anders zu ergreifen. Für die Physik wird dafür ausdrücklich empfohlen, vom »Bewegungsmenschen« auszugehen, und zwar nicht einfach dadurch, dass man versucht, dafür innere Empfindungen zum Ausgangspunkt zu machen. Ich will mich bemühen, exemplarisch zu schildern, wie man in diesem Sinne den Begriff »Gewicht« und sein Umfeld umreißen könnte.

Zwischen Aufprallen und Abstoßen

Johannes Kühl hat in direkter Anknüpfung an diesen Ansatz Steiners die Mechanik des menschlichen Gangs näher untersucht.⁶ Die Bewegungsabläufe beim Gehen wurden z.B. mit Hilfe von Filmaufnahmen ebenso detailliert dokumentiert und ausgewertet wie die Belastung des Untergrundes durch den Fuß mit Hilfe von speziellen Messgeräten. Gehen erscheint als ein dynamischer Wechsel von Phasen des Fallens und des Aufstrebens, des Beschleunigens und Bremsens. All diese Phasen bedingen sich gegenseitig – es ist unmöglich, im Bewegungsvorgang einfach innezuhalten (Anzuhalten ist ein eigener Bewegungsvorgang!). Versucht man, so zu gehen, dass *jederzeit* an- bzw. innegehalten werden könnte, hat das mit »Gehen« nicht mehr viel zu tun.⁷

Für den Unterricht mit einer 10. Klasse wird man keine hochtechnischen Geräte zur Verfügung haben, sie vielleicht nicht einmal zur Verfügung haben wollen. Der Bewegungsablauf des Gehens lässt sich dennoch wenigstens qualitativ auch gut durch aufmerksames Selber-Gehen und Zusehen erschließen. Zudem bekommt man einen erstaunlich differenzierten Eindruck von den Belastungen des Untergrundes, indem man Fußabdrücke in nicht zu trockenem Sand untersucht.

4 Hermann Bauer z. B. vertritt in seinem Aufsatz »Gibt es eine Schwerkraft?«, Mathematisch-Physikalische Korrespondenz 100 (1976): »Der Kraftbegriff der Physik ist untrennbar mit dem Erleben der Kraftanstrengung (Muskelkraft) verknüpft« und nennt dafür prominente Zeugen.

5 »... versuche einmal die Bewegungsmechanik am Menschen zu studieren von außen her, wie man es einstmals von innen her erlebt hat, dann hast du dasjenige, was du brauchst für deine äußere Naturbeobachtung in Physik und Chemie.« Aus: 9. Vortrag in »Der Entstehungsmoment der Naturwissenschaft in der Weltgeschichte«, GA 326, Dornach ³1977

6 Elemente der Naturwissenschaft 42 und 43 (1985)

7 Wenn Sie es noch nicht kennen, versuchen Sie es unbedingt!

Der Bewegungsablauf *eines* Beines gliedert sich grob in vier Phasen: Über den frisch aufgesetzten Fuß wird abgerollt; das Bein stemmt allein, während das andere Bein nach vorne kommt; es drückt sich ab und schwingt nun nach vorne. Die Vorwärtsbewegung des Kopfes ist dabei ziemlich gleichmäßig, allerdings bewegt er sich während des Gehens immer ein wenig auf und nieder. Vergleicht man den Abdruck des langsam gesetzten Fußes (zum einbeinigen Stand) mit dem beim Gehen, ist zu bemerken, wie ersterer Ab- oder Eindruck einer Form ist, letzterer aber die Spur eines komplexen Bewegungsablaufs. Beim Gehen wird der Untergrund nicht nur von oben, sondern auch seitlich und in oder gegen die



Abb. 1: Dass jeder Mensch seinen eigenen Gang hat, sieht man an der individuellen Abnutzung der Schuhe. Abrieb gibt es dabei an den »unmöglichsten« Stellen, nicht nur etwa an der Ferse hinten!

Bewegungsrichtung belastet (vgl. *Abb. 1*).

Eine zweite wichtige Beobachtung ist, dass Ballen- und Fersenabdruck dabei deutlich tiefer sind als beim gesetzten Fuß, sogar tiefer als beim Stehen auf einer Ferse. Ist beim Gehen die Belastung des Untergrunds (für das Aufsetzen des Fußes und das Sich-Abdrücken) *größer als das Körpergewicht?*⁸ Geht man vom Gehen zum Laufen über, wobei ja für Augenblicke der Läufer gar nicht mehr den Boden berührt, wird dieser Effekt noch deutlicher.

Auch beim Gehen liegt zwischen dem Abdrücken mit dem einen und dem Aufsetzen des anderen Fußes eine kurze Spanne Leichtigkeit. Das Abstoßen nach vorne oben lässt uns allerdings nicht zu weit »fliegen« – wir fallen und prallen

8 Die Belastung ist phasenweise tatsächlich größer als das Gewicht, aber auch phasenweise kleiner – im Zeitmittel muss natürlich gerade das Gewicht herauskommen!

auf, und zwar auf unseren anderen ausgestreckten Fuß. Das Fallenmüssen ist dabei universell (eine wichtige Beobachtung!), das heißt, ein Schicksal, das unser Leib mit den anderen Körpern auf der Erde teilt: »*What goes up must come down.*« Und offenbar hängt die Stärke des Aufpralls mit der Höhe des Falls zusammen.

Nun kann man einen aufschlussreichen weiteren Versuch anstellen: Auf einer Tafelwaage werden zwei gleichschwere Springbälle verglichen; was macht nun die Waage, wenn einer von beiden hüpft (*Abb. 2*)?



Abb. 2: Was wiegt ein springender Ball? Offenbar mal mehr, mal weniger als ein aufliegender ... Vor dem Aufprall streben Ball und Waage aufeinander zu, nach dem Absprung auseinander.

Wir nehmen einen Ball in die Hand und halten mit der anderen die Waage im Gleichgewicht. Lässt man den Ball auf die Platte der Waage fallen und die Waage selbst los, strebt die unbelastete Seite nach oben (sie ist ja leichter!), erhält beim Aufprall und Abspringen des Balles aber (und auch später immer wieder) einen mehr oder weniger kräftigen Stoß nach unten – und strebt wieder nach oben. Die Waage führt also eine zum Ball gegenläufige Bewegung aus, deren Ausschlag umso mehr abnimmt, je niedriger der Ball springt. Bleibt dieser zuletzt liegen, kommt die Waage nach dem Ausschaukeln ins Gleichgewicht. Die Zeitdauer *und* die gesprungene Höhe zwischen Sich-Abstoßen und Aufprallen des Balles wird offenbar immer geringer, das Lasten auf den Untergrund nähert sich dabei immer mehr dem Ruhgewicht. Bleibt der Ball zuletzt liegen, ist der Aufprall (und der Abstoß) gerade so stark, dass der Ball gegen die Falltendenz der Körper hier auf der Erde gehalten wird (aber nicht mehr davonspringen kann). Der Gegendruck der Waage kann ihn gerade halten; was vorliegt, ließe sich vielleicht auch so formulieren: *Gewicht ist das zartestmögliche Aufprallen beim Fallen und gleichzeitig das zartestmögliche Sich-Abdrücken auf den bzw. vom Untergrund.*

Diese Sicht entspricht in der üblichen Sprechweise der Physik folgendem Gedanken: Wir sprechen nicht von einem *Schwerefeld*, sondern von einem *Beschleunigungs- oder Fallfeld*. Die Physiker beginnen die Mechanik gerne mit dem ersten Newtonschen Gesetz (dem Trägheitsgesetz): »Ein Körper ruht oder bewegt sich gleichförmig und geradlinig, falls keine äußeren Kräfte auf ihn wirken.« Unser Ausgangspunkt ist stattdessen: »Ohne Krafteinwirkung fällt jeder Körper mit einer bestimmten Beschleunigung.« Wir legen damit etwas in doppeltem

Sinn Gegensätzliches zu Grunde:⁹

1. Beobachtbar ist die Falltendenz; das Trägheitsgesetz ist aus Beobachtungen abstrahiert, ist eine Idee.
2. Fallen (als beschleunigte Bewegung) ist nicht Folge einer Kraft (dem Gewicht), sondern alles fällt genau dann frei, wenn es kräftefrei ist (Festhalten dagegen bräuchte Kraft).

Die Vorgänge Aufprallen und Abdrücken korrespondieren mit dem Druck des Balles auf die Unterlage und umgekehrt, genauer: dem *Sich-gegenseitig-Eindrücken* der beiden.

Mit einer solchen Sicht des Vorgangs hat man also einerseits eine Art universeller Falltendenz (der Dinge auf der Erde) im Blick, andererseits auch das permanente Sich-entgegen-Stemmen der Körper und des Untergrundes. Die Untersuchung des Fallens führt auf die Fallgesetze und die Wurfparabel, die Gesetze der *freien Bewegung*.

Unter irdischen Verhältnissen ist allerdings keine Bewegung ganz frei, denn allein schon der Luftwiderstand zum Beispiel behindert sie (umso mehr, je schneller bewegt wird). Auch kommt jede Bewegung, die nicht von außen in Gang gehalten wird, irgendwann an ein Ende, kommt »unten an«.

Nun gibt es aber auch Zwischenformen der Bewegung, die weder frei (selbst wenn man vom Luftwiderstand u. ä. absieht) noch einfach in Ruhe sind und dennoch ein Stück weit ohne Antrieb sozusagen »von allein« funktionieren: Ich denke z.B. an das Bergabfahren mit einem Fahrrad,¹⁰ das Ski-, Schlitten- oder Snowboardfahren, oder auch das Fließen von Wasser in einem Bett.¹¹ Wie lassen sich diese beiden Phänomene einordnen?



Abb: 3: Bergab rollen ist offenbar weder ein Ruhen noch freier Fall, hat aber Elemente von beidem – Wie steht es dabei z.B. mit der Belastung des Untergrundes?

9 Diese Sichtweise führt offenbar in Richtung der allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins.

10 Vgl. Florian Theilmann: »Auf Galileis Spuren?« In: Lehrerrundbrief 72 (Juni 2001)

11 Vgl. 5. und 6. Vortrag in Rudolf Steiner: »Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwicklung der Physik«, GA 321 (»Wärmekurs«), Dornach 42000, und F. Theilmann: »Druck

Mechanik zwischen Fall und Form

Wenn wir den Gedanken: »Alle Körper auf der Erde haben (im Prinzip in gleicher Art) die Tendenz zu fallen«, ernst nehmen, müssen wir uns fragen: *Warum tun sie es denn offensichtlich nicht alle?* Nun, was sich nicht bewegt, ist entweder angeschraubt, -geklebt oder -genagelt, sonst irgendwie befestigt, aufgehängt, oder es liegt einfach auf festem Untergrund. Auch der Rad- oder Skifahrer in Bewegung lastet auf dem Untergrund, doch am Hang nicht genauso wie im Flachen: Das Ruhen stellen wir uns ja als eine Art dauerndes Gegenbeschleunigen vor, als kontinuierliches Aufprallen-Abdrücken; gleiten wir mit Skiern den Hang hinunter, wird das Fallen nach unten zu einer Art Fallen nach vorne-unten, die Bewegung ist nicht mehr völlig frei, sondern sie wird gleichsam umgeleitet, wird (durch Druck des Untergrundes nach vorne oben) *geführt*.¹²

Eine Bewegung zu führen hieße in diesem Sinn, sie in Richtung oder Geschwindigkeit zu beeinflussen. Auch einfaches Festhalten wäre somit als Führen (gegen das freie Fallen) zu deuten. Und wir finden, wenn wir die Erscheinungswelt daraufhin untersuchen, ein erstes mechanisches Prinzip (Gesetz) vor: Um zu führen, muss eingegriffen werden. *Um die Bewegung eines Körpers zu führen, muss auf diesen Druck oder Zug ausgeübt werden.* In üblicher Sprechweise wäre dies das zweite Newtonsche Gesetz, » $F = m \cdot a$ «. Ausgeübter »Druck« oder »Zug« meint allerdings etwas durchaus Konkretes und Beobachtbares – z.B. knirscht Kies unter den Rädern, oder Aufhängungen dehnen sich sichtlich bzw. reißen gar. Das heißt auch: Sobald ein Gegenstand nicht einfach nur fallen soll, braucht es ein Drumherum, eine Umgebung, die dagegen drücken oder ziehen kann, die fest oder steif ist. Meine Hand hält die Kaffeetasse, mein Arm die Hand, mein Rumpf den Arm, der Stuhl und die Beine meinen Rumpf, der Fußboden Stuhl und Beine, die Mauern den Fußboden, *die Erde die Mauern und damit alles andere*. Wir bemerken: Es ist dies ein Weg vom Kleinen ins Große, vom Konkreten ins Unkonkrete, vom Bewussten ins Unbewusste. Halten oder Tragen mit dem Leib hat offenbar mit Steif-Sein oder Sich-steif-Machen zu tun; kann dies durch Knochen realisiert werden (Tragen auf dem Kopf oder der Schulter), geht es sehr viel leichter, als wenn Muskeln betätigt werden müssen.

Das Feste in der Welt ist – anders als Flüssigkeiten oder Gase¹³ – gerade dadurch charakterisiert, dass es seine eigene Form zu behalten bestrebt ist. Wird nun das Feste gedrückt (oder an ihm gezogen), verformt es sich zwar unweigerlich, andererseits aber entsteht gerade durch die Tendenz, die alte Form wiederherzustellen, ein Widerstand, es tritt Gegendruck (-zug) auf. Dies wäre ein weiteres mechanisches Prinzip: *Druck und Zug zwischen Körpern sind immer völlig gegenseitig.* In der üblichen Sprechweise wäre dies das dritte Newtonsche Gesetz, *actio = reactio*, das, wenn es als »Kraft = Gegenkraft« formuliert ist, nur

12 Vgl. F. Theilmann: »Zu den Begriffen Kraft und Energie«, in: Lehrerrundbrief 73 (Dezember 2001)

13 Vgl. F. Theilmann: »Druck und Fließen«, Anm. 11

einen abstrakten Sachverhalt bezeichnet und eine Ursache-Wirkungs-Beziehung suggeriert. Das bedeutet sogar: Ich kann nur so stark drücken (ziehen), wie entgegengedrückt (-gezogen) wird! (Man denke an die Schwierigkeiten beim Einschlagen eines Nagels in ein zurückfederndes Brett ...).

Die Verformbarkeit eines Körpers charakterisiert sich durch zwei ganz unab-



Abb. 4: Das Gewicht der Quittenfrucht verformt – wie jede andere Belastung auch – den Ast. Gewachsenes Holz ist dabei »vorgespannt«, was die verschiedene Belastbarkeit von Holz gegen Druck und Zug vorteilhaft ausgleicht.

hängige, »orthogonale« Eigenschaften: Es gibt die Skala »hart – weich« und die Skala »plastisch – elastisch«. Der Körper ist umso härter, je weniger er sich unter einer bestimmten Belastung verformt. Und er ist umso elastischer, je reversibler die Verformung ist. Ganz ohne Verformung kommt man bei Belastung unter keinen Umständen davon, und, so sagen die Materialwissenschaftler, auch nie ohne plastische Verformung, ohne ein »Ausleiern«. Diese Tatsache und die Gesetzmäßigkeiten des Sich-gegenseitig-Drückens/Ziehens führen uns mitten in das Gebiet der Statik. Repräsentiert man Druck und Zug durch Vektorpfeile,

kann auch auf Zehntklass-Niveau sehr viel berechnet, konstruiert und verstanden werden.¹⁴

So haben wir einerseits das fast mathematische reine Fallen, bei dem die Dinge eigentlich (Masse-)Punkte sind, andererseits die Statik. Beim freien Fallen hat der Körper gerade keine Wechselwirkung mit der umgebenden Stoffwelt, bei der Statik ist er ganz im Gegenständlichen angekommen: Größe, Form, Härte, Lage usw. sind jetzt wichtig. Das geführte Sich-Bewegen, das Bergabrollen, Heben, Fahren, Schwingen, Drehen usw. steht wie dazwischen: Gegen die allgemeine Falltendenz und die vielfältigen Widerstände der Luft, der Lager usw. oder für jede Richtungs- und Geschwindigkeitsänderung muss gedrückt oder gezogen werden. Die Bewegung ist nicht mehr *frei*, was sich durch Verformung an Körper und Führung auch *zeigt*.

Fußball gegen Fensterscheibe

Wie findet man sich jetzt in einer konkreten Situation, etwa »Fußball gegen Fensterscheibe«, zurecht, wenn man sie mechanisch untersuchen will? Versuchen wir es so: Wir vergegenwärtigen uns zuerst den Bewegungsvorgang. Der Ball fliegt zunächst (bis auf seinen Luftwiderstand) frei und wird an der Fensterscheibe gebremst. Das Bremsen verlangt Druck gegen die Bewegungsrichtung. Der anprallende Ball biegt die Scheibe (in Bewegungsrichtung), die mit Druck in die Gegenrichtung antwortet. Der Druck in die eine Richtung fordert Druck in die andere Richtung, auch der Ball wird vorne plattgedrückt.

Nun ist Folgendes wichtig: Die Bewegung kann ich mir problemlos vorstellen, im Bild als fliegenden Ball und als gleichsam geometrischen Vorgang, den ich denkerisch mitmache. Mein Vorstellen entspricht dabei dem Vorgang, bildet ihn in seinen Charakteristika ab, sofern sie das Bewegungshafte betreffen, und ich kann dabei wach und bewusst bleiben. Auch den Aufprallvorgang kann ich mir noch als Bild vorstellen; dem Druck und den Materialspannungen gegenüber ist aber ein Eintauchen in Erfahrungen an meinem eigenen Leib gefordert, die ich nicht mit klarem Bewusstsein, sondern nur existenziell gemacht haben kann: meine Anstrengung, meine Anspannung, mein Schmerz. Wende ich mich der Bewegung zu, bin ich draußen, in der Welt (es erfordert ja intensives Üben, eine eigene Bewegung »von innen her« zu gestalten). Stelle ich mir nicht nur vor, wie es aussieht, wenn sich jemand anstrengt, sondern wende ich mich der Anstrengung selber zu, werde ich ganz auf innere Befindlichkeiten gewiesen. Gedanklich kann ich dies nicht real nachbilden, sondern eben nur bild- oder gleichnishaft (die Formeln und Vektoren stehen für Vorgänge, sie sind sie nicht). Will ich nicht nur bei Bildern und Gleichnissen bleiben oder in Leiberlebnissen untertauchen,

14 Vgl. M. v. Mackensen und H.-C. Ohlendorf: »Kräfte – eine Einführung«, Arbeitsmaterialien der Pädagogischen Forschungsstelle Kassel. Vgl. auch Georg Maier: »Baupformen als Ausdruck mechanischer Kräfte«, Elemente der Naturwissenschaft 27 (1977)

kommt an *bewusstem* Verhältnis dem konkreten Vorgang gegenüber nur das äußerliche Untersuchen, das Messen, das Nachsehen-wie-es-ist in Betracht.¹⁵

Dass ich es auf der einen Seite mit dem freien Spiel der Gedanken zu tun habe und auf der anderen mit Tatsachen, spiegelt sich im Vorgang selbst: Ist im geschilderten Vorgang der Druck des Balls auf die Scheibe in irgendeinem Sinn ursprünglicher als der »Antwortdruck« der Scheibe auf den Ball? Derselbe Vorgang lässt sich von der Bewegungsseite her auch ganz anders lesen. Könnte der Ball reden, erzählte er vielleicht danach Folgendes: »Während ich frei schwebte, kommt doch diese Fensterscheibe auf mich zugerast und deltt mich ein. Na, ich drücke zurück, bremsen sie, sie biegt sich dabei und dann ...« Vielleicht ist es dem Leser schon einmal passiert, dass er bergauf an der Ampel steht, der Vordermann trotz Hupens zurückrollt, des Lesers Auto anrempelt und sich dann *ganz unschuldig* fühlt? Das ist in etwa die Situation. Der Beschleunigungsvorgang (sogar Bewegung überhaupt) ist ein Verhältnis zwischen Körpern, nicht ein Vorgang in einem absoluten Raum;¹⁶ dasselbe gilt für das Sich-Drücken. Wer wen dabei bremsen oder anschiebt, ist interpretationsfähig, doch die Druck- und Zugverhältnisse liegen einfach vor und sind immer symmetrisch. Es gibt im aktuellen *actio = reactio* keinen Auslöser und keine Antwort, die Verhältnisse sind einfach völlig gegenseitig. Das Urteil, dass es der Ball ist, der die Fensterscheibe zerschlägt, scheint mir als Analogie aus dem eindeutig-willkürlichen Verhältnis zu kommen, das wir zu unseren eigenen Bewegungen haben. Äußerlich-physikalisch kann ich weder *agens* (handelnd) noch *patiens* (erleidend) festmachen, aber lebenspraktisch kann ich es.

Das heißt nicht, dass die Verhältnisse auch in ihren Auswirkungen für die Beteiligten einfach gleich oder symmetrisch sind; die mechanischen Wirkungen Druck/Zug sind zwar gegenseitig, die Folgen und Bedingungen dieser Wirkungen sind dann aber jeweils konkret und damit situativ besonders. »Täter« und »Opfer« scheinen mir dabei allerdings keine physikalische Kategorien. Nicht der Ball oder das Fenster sollen entscheiden, sondern der Schütze. Ich selber weiß zwar fast immer, ob ich meine Bewegung ausübe oder erleide, weil meine Leibeserfahrungen jeweils besonders sind. (So wird z. B. das Steigen nach oben oder nach unten als etwas sehr Verschiedenes erlebt.) Die Statik des Vorgangs aber »ist, wie sie ist«, sie hängt von diesem Wissen nicht ab. Die unterschiedliche Verantwortung gegenüber einem Vorgang, die in *agens* und *patiens* anklängt, beruht nicht auf einer Ursprünglichkeit im physikalischen Sinn, sondern entsteht etwa da, wo etwas gewollt wird.

15 Vgl. 1. und 2. Vortrag in Rudolf Steiner: »Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwicklung der Physik«, GA 320 (»Lichtkurs«), Dornach ³1987. Auch das Parallelogramm von Bewegungsvektoren ist in diesem Sinne »nur Bild«. Der Unterschied ist das wache Verhältnis, das ich zum Gegenstand des Bildes habe.

16 Vgl. zu einer solchen Sicht auch R. Steiner: »Einleitung zu Goethes Naturwissenschaftlichen Schriften«, GA 1, Dornach ³1973, Kap. XVI. 5: Der Goethesche Raumbefund

Worum ging es?

Ausgangspunkt war der Versuch gewesen, mechanische Begrifflichkeit aus der Physik des Bewegungsmenschen zu entwickeln. Gesucht wurde eine Betrachtungsart »von außen her«: streng-gedanklich, äußerlich-wissenschaftlich, eine Sichtweise, die nicht das verneint, was die konventionelle Sicht leistet, und die in möglichst umfassendem Sinn versucht, die Erscheinungen in ihrem Zusammenhang mit dem Menschen und seiner Umgebung zu sehen. Die hier geschilderte Skizze der Mechanik des Gehens verstehe ich als einen Versuch, dieses Programm einzulösen, nicht als (doch nicht zu leistenden) »Mustereinstieg« in die Epoche, sondern als methodische Anregung für den Lehrer.

Im zweiten naturwissenschaftlichen Kurs¹⁷ charakterisiert Rudolf Steiner die Aggregatzustände der Materie – Gasförmiges, Flüssiges, Festes – durch ihr unterschiedliches Verhältnis zu zwei grundlegenden Prinzipien: dem Fallen und der Art, wie Gestalt gebildet wird. Aus meiner heutigen Sicht entspricht dem die Tatsache, dass wir in der Mechanik Bewegungslehre und Statik als jeweils eigene Gebiete vorfinden. Die Unterscheidung von Bewegungslehre (»Phoronomie«) und Statik (»eigentliche Mechanik«) geht dabei ebenfalls auf eine mehrmalige Anregung Steiners zurück.¹⁸ In beiden Gebieten leistet die mathematische Naturbeschreibung Großartiges. Was an Formeln und Methoden schon vorhanden ist, lässt sich nun *einordnen*; es muss zwar vielleicht manchmal anders gelesen oder gedeutet, aber nicht abgeschafft werden.

Ausgangspunkte für ein Verhältnis zu mechanischen Vorgängen sind hier weder Axiome noch Erlebnisse an den eigenen Muskeln o.ä. (man müsste auch noch genauer anschauen, welcher Art solche Erlebnisse sein könnten), vielmehr die Zuwendung zu Grundtätigkeiten oder -gebärden wie Gehen oder Halten. Dies führt zum einen in die Nähe einer Auseinandersetzung mit Urphänomenen oder *Grundtatsachen*, die man vielleicht eher als Grundtätigkeiten bezeichnen könnte.¹⁹ Zum anderen vermeidet man vielleicht manche (didaktische) Verwirrung, indem man nicht mehr oder weniger naiv Begriffe an Erlebnisse anknüpft. So war mir lange schmerzlich unklar, warum es anstrengend ist, eine Tasche mit ausgestrecktem Arm vor mich zu halten, in »Arbeit = Kraft mal Weg« der Weg beim Festhalten aber ja Null ist, also gar keine Arbeit verrichtet werden sollte. Der Blick darauf, dass es beim Halten einfach darum geht, den Leib steif zu machen, dass Knochen von allein steif sind, Muskeln aber nur unter Stoffwechsellaktivität, erleichtert wohl das Verständnis. Dass und wie die ganze Energetik ins

17 Vgl. Anm. 10

18 Vgl. 1. und 2. Vortrag im »Lichtkurs«, s. Anm. 15, oder 3. Vortrag in »Grenzen der Naturerkenntnis«, GA 322, Dornach ⁵1981

19 Vgl. Georg Maier: »Wirksamwerden von Fähigkeiten in der Gemeinschaft individueller Wesen«, in: »Das Goetheanum« 45/2001, S. 817; und Florian Theilmann: »Beweis und Urphänomen«, in: »Das Goetheanum« 46/2001, S. 842

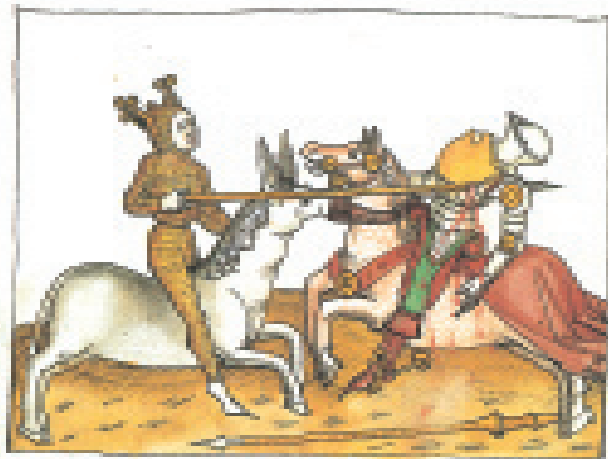
Reich der Bewegungslehre gehört, wäre noch getrennt darzustellen (für einige Ideen dazu vgl. Anm. 11).

Schauen wir gesondert auf die Bewegungen und die herrschenden Druck-/Zugverhältnisse, so sind überraschende Einsichten oder überhaupt erst echtes Verständnis an vermeintlich altbekannten und auch schwierigen Themen möglich.²⁰ Ich sehe es als einen Fortschritt an, dass sich in solchen Diskussionen der Begriff »(äußere) Kraft (die angreift)« vermeiden lässt – ausgeübter Druck oder Zug sind konkret und machen sich immer bemerkbar. Spreche ich abstrakt von der Kraft, die in den Formeln steht (ich denke z.B. an die rechnerische Größe »Trägheitskraft« oder sog. Scheinkräfte), entspricht dem nichts Beobachtbares. Auch steht die Frage, ob Kräfte ursprünglicher sind als Gegenkräfte, sofort wieder im Raum. Vom »Fallfeld« statt vom »Schwerefeld« zu reden, führt stattdessen zwanglos in die Nähe moderner mechanischer Konzepte wie Potenzial (als geometrischer Qualität des Raums) oder allgemeiner Relativitätstheorie.

Zum Autor: Dr. Florian Theilmann, Jahrgang 1967, Studium und Promotion in Physik, berufsbegleitendes Lehrerseminar in Kassel. 1998/99 Oberstufenlehrer in Weimar, jetzt wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut am Goetheanum in Dornach.

20 Vgl. »Auf Galileis Spuren?«, s. Anm. 10, und Johannes Kühl: »Zum Verständnis des Kreisels«, *Elemente der Naturwissenschaft* 73 (2000)

Im letzten Heft (1/2002) ist wegen eines technischen Fehlers ein Bild auf Seite 29 falsch platziert worden, so dass weder Motiv, noch Farbe und Bildlegende zueinander passen. Das richtige Bild, in Farbe, mit der richtigen Bildlegende sehen Sie nebenstehend.



*Parzivals Totschlag an Ither,
Miniatur aus der Berner Parzival-Handschrift*