

## Über die konstruktive Rolle der Reibung

H. J. Schlichting und B. Rodewald

### 1. Problemstellung

Obwohl die klassische Mechanik sich auf Vorgänge (wie Bewegungen, Kraftwirkungen usw.) bezieht, die eine unmittelbare Bedeutung für elementare lebensweltliche Erfahrungen haben, erweist die sich als Quelle von Lernschwierigkeiten für die Schüler. Einer der wesentlichen Gründe dürfte darin zu sehen sein, daß von den Schülern letztlich verlangt wird, „die Welt so zu beschreiben, wie wir sie nicht erfahren“ (WEIZÄCKER 1966, S. 107). Im Unterschied zu dem, was sie unmittelbar beobachten und erleben, nämlich, daß schwere Gegenstände schneller als leichte fallen, zur Aufrechterhaltung einer gleichförmigen Bewegung eine Kraft nötig ist usw., werden der klassischen Mechanik dem widersprechende Erfahrungen zugrunde gelegt. Nachgewiesen wird die Richtigkeit jener – physikalisch genannten – Erfahrungen i. a. mit Geräten wie Luftkissenbahn, evakuierten Glasröhren usw., die häufig eigens zu diesem Demonstrationszweck hergestellt wurden.

Die Differenz zwischen Alltagswelt der Schüler und Laborwelt des Physikers wird mit dem im Prinzip vernachlässigbaren Effekt der Reibung wegdiskutiert<sup>1</sup>. Ein wesentlicher Rechtfertigungsgrund für die Vernachlässigung der Reibung wird vor allem darin gesehen, daß die dadurch bedingte Abweichung von der jeweiligen Realsituation angeblich nur gering ist und daher grundsätzlich zu einer zutreffenden Beschreibung führt. Wie man sich an zahlreichen Beispielen klarmachen kann, verhält es sich häufig aber ganz anders. Viele Phänomene lassen sich überhaupt erst durch die Zugrundelegung

---

<sup>1</sup> Daraus ergeben sich bereits bei der Begriffsbildung Lernschwierigkeiten, die vor allem darin bestehen, daß die Schüler nicht auf das im Alltag erworbene Verständnis der Begriffe zurückgreifen könne. Schwerwiegender scheinen uns aber jene Lernschwierigkeiten zu sein, die sich bei Anwendung der Begriffe in komplexeren Situationen und konkreten Problemstellungen ergeben, weil die Schüler sich dabei nur bedingt auf ihre vorgängige, durch Reibung geprägte Erfahrung und Intuition verlassen können, häufig dadurch sogar noch behindert werden. Wie wenig vertraut man normalerweise mit einer reibungsfreien Welt ist, zeigt sich z. B. in der Zahl der Verkehrsunfälle bei Glatteis, wenn die Reibung geringer ist als man gewohnt ist.

von Reibung erklären: Ohne Reibung würde sich beispielsweise ein Auto nicht in Bewegung setzen, könnte es keine Kurve fahren und wäre nicht wieder zur Ruhe zu bringen.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich einige grundsätzliche Konsequenzen für den Physikunterricht.

Möchte man das bewährte Prinzip, von Phänomenen des Alltags auszugehen, bei der Erarbeitung physikalischer Begriffe und Vorstellungen nicht aufgeben, so muß dafür Sorge getragen werden, daß eine Realsituation als Ausgangspunkt gewählt wird<sup>2</sup>. Solange man sich auf eine qualitative Analyse beschränkt, können dann Idealisierungen wie Reibungsfreiheit und Linearität weitgehend unterbleiben. Das hat den Vorteil, daß in den nachfolgenden Bemühungen um eine quantitative Darstellung den Schülern bewußt gemacht werden kann, welche Gehaltseinbußen die dabei notwendigen Vereinfachungen bedingen. Insbesondere kann dadurch die Einsicht ermöglicht werden, ob die Vernachlässigung von Reibung die für die Beschreibung eines Phänomens wesentlichen Aspekte unterdrückt oder nicht.

In den folgenden Ausführungen soll auf die Bedeutung der Reibung bei der Beschreibung vieler Phänomene hingewiesen und damit unsere Auffassung illustriert werden, daß die Reibung mit –anderer Bewertung und stärkerem Gewicht im Physikunterricht berücksichtigt werden sollte. In diesem Sinne werden wir zunächst die ambivalente Rolle der Reibung und daran anschließend insbesondere den konstruktiven Aspekt der Reibung ansprechen. Letzterer hat erst in jüngster Zeit die Aufmerksamkeit der Physiker auf sich gezogen.

### 2. Zur ambivalenten Rolle der Reibung

Reibung führt in der realen Welt letztlich zum Stillstand jeder Bewegung. Daher reduzieren sich im Grunde alle Anstrengungen, die der Mensch zu unternehmen hat, um Bewegungen aufrecht zu erhalten, auf die Überwindung der Reibung. So gesehen

---

<sup>2</sup> In einem anderen Zusammenhang als dem hier beschriebenen wurde an anderer Stelle (SCHLICHTING et al. 1983 a) ein entsprechender Vorschlag für den Unterricht skizziert.

haftet der Reibung zunächst das Merkmal des Destruktiven an. Andererseits überzeugt man sich leicht davon, daß viele Bewegungstypen ohne Reibung überhaupt nicht möglich wären. Der sich bereits hierin äußernde konstruktive Aspekt der Reibung sowie die damit verbundenen Phänomene werden durch eine die Reibung vernachlässigende Beschreibung notwendigerweise übersehen. Die hiermit angesprochene ambivalente Rolle der Reibung ist nicht nur typisch für mechanische Vorgänge, sondern gilt ganz allgemein, wenn man das Reibungskonzept dahingehend verallgemeinert, daß man unter Reibung Dissipation von Energie versteht, also eine unwiderrufliche Abgabe einer hochwertigen Energieart (vgl. SCHLICHTING 1983 b, S. 30 ff) an ein Wärmereservoir, normalerweise die Umgebung (Energieentwertung).

Historisch kann man die Formulierung der Erfahrung, daß insbesondere Wärmekraftmaschinen, allgemein jeder Vorgang mit Dissipation von Energie (oder – äquivalent damit – mit Entwertung von Energie, Zunahme von Entropie) einhergeht, zunächst als Eingeständnis ansehen, daß, anders als die reibungsfreie Mechanik zu suggerieren scheint, Irreversibilität, Verfall von Strukturen, Vergänglichkeit, der Wärmetod der Welt gar, das Natürliche darstellen. Das ist gerade heute aktueller denn je. Schließlich scheint es vor allem dem Prinzip der Energiedissipation – als ein solches kann der zweite Hauptsatz der Thermodynamik formuliert werden (vgl. ebenda S. 22) – zu verdanken zu sein, daß die Menschheit in die Energiekrise geschlittert ist: Der destruktive Aspekt der Reibung oder Dissipation bzw. die Energieentwertung steht im Vordergrund. Denn ohne sie könnte Energie unbegrenzt genutzt werden, womit man wieder bei jener, reale Verhältnisse nur äußerst unvollkommen wiedergebenden, reibungsfreien Welt wäre. Wenn aber diese destruktive Rolle der Dissipation ein so starkes Gewicht besitzt, worin besteht dann ihr konstruktiver Aspekt?

Zum einen gibt es Situationen, in denen aus menschlicher Sicht die mit der Dissipation bzw. Reibung verbundene Erreichung des (thermischen) Gleichgewichts durchaus erwünscht sein kann.

Ein Beispiel dafür wurde mit der Reibung, die das Anfahren und Kurvenfahren eines Autos ermöglicht, bereits genannt. Dazu gehört auch die Reibung, die eine Waage, einen Würfel, eine Billiardkugel zur Ruhe bringt und dergleichen mehr.

Während das Konstruktive der Dissipation hier mehr der subjektiven Bewertung durch den Menschen zuzuschreiben ist, gibt es zum anderen auch Beispiele, bei denen das Konstruktive der Dissipation bzw. Reibung i. e. S. als objektiv angesehen werden kann: Mit Dissipation von Energie einher-

gehende Vorgänge wie Dicht-, Temperatur-, Spannungsausgleichsvorgänge usw. können entsprechende Vorgänge in umgekehrter Richtung ablaufen lassen, um dabei jene vom Menschen erwünschten Phänomene wie Wärme, Bewegung, Licht, Schall usw. hervorzubringen. Nehmen wir ein Beispiel: Bei der Verbrennung von Benzin auf freiem Felde wird (wertvolle) chemische Energie dissipiert, ohne daß etwa Nützliches bewirkt wird. Läßt man die Verbrennung in geeigneter Weise in einem Verbrennungsmotor ablaufen, so kann dadurch die Bewegung eines Fahrzeugs, entgegen der durch das –Prinzip der Energiedissipation bedingten Tendenz stehenzubleiben, aufrechterhalten werden.

Letztlich wird jeder Prozeß, der zu einer höheren Organisation von Materie im raum-zeitlichen wie im funktionalen Sinne führt, durch Dissipationsvorgänge, wenn man so will, durch Reibung, betrieben. Gegen das Prinzip der Energiedissipation bzw. –entwertung wird dabei insofern nicht verstoßen, als die mit dem „angetriebenen“ Prozeß verbundene Energieaufwertung kleiner ist als die mit dem „treibenden“ Dissipationsvorgang verbundene Energieentwertung.

Demnach wird alles Geschehen in der Welt durch Dissipation gleichzeitig betrieben und begrenzt. diese Formulierung bringt die ambivalente Rolle der Dissipation bzw. Reibung unmittelbar zum Ausdruck.

### 3. Dissipative Strukturen

Dieses Ergebnis besagt also insbesondere, daß durch Dissipation nicht nur Strukturen zerstört, Unterschiede ausgeglichen werden, Leber erlischt, sondern auch, daß Strukturen entstehen, Unterschiede aufgebaut werden, Leben erschaffen wird. Strukturen, die durch Dissipation von Energie aufgebaut und aufrecht erhalten werden, nennt man daher auch in naheliegender Weise dissipative Strukturen (siehe jedoch PRIGOGINE et al. 1980). Beispiele dafür sind:

- eine strömende Flüssigkeit,
- ein elektrischer Strom,
- der „pickende Specht“<sup>3</sup>
- Licht aussendender Laser,
- Sechseckzellen, die zuweilen beim Erwärmen von Fett in der Pfanne zu beobachten sind,

---

<sup>3</sup> Es handelt sich hierbei um ein käuflich zu erwerbendes Spielzeug, das in einem folgenden Beitrag (RODEWALD et al. 1983) als Paradigma für eine dissipative Struktur behandelt wird. Dort werden die hier nur allgemein angesprochenen Begriffe konkretisiert.

- Flattern einer Fahne im Wind,
- quietschende Kreide an der Wandtafel,
- das Erklingen einer Geigensaite,
- ein lebender Organismus.

Systeme, die solche Strukturen aufweisen, befinden sich nicht im thermischen Gleichgewicht, sie sind offen und werden durch die Aufnahme hochwertiger Energie und die Abgabe minderwertiger Energie, also durch Dissipation von Energie in einen „mehr oder weniger weit“ vom thermischen Gleichgewicht entfernten stationären Zustand getrieben. Dieser weist (bei Konstanzhaltung der Randbedingungen) teilweise ähnliche Merkmale auf wie der Zustand des thermischen Gleichgewichts:

Sowohl das thermische Gleichgewicht als auch der stationäre Zustand sind durch den Extremalwert einer charakteristischen Funktion gekennzeichnet. Dem thermischen Gleichgewicht entspricht maximale Entropie, dem stationären Gleichgewicht entspricht minimale Entropieproduktion (Entropie pro Zeiteinheit) oder minimale Überschussentropieproduktion – je nachdem, ob sich der stationäre Zustand in der Nähe des thermischen Gleichgewichts (Fließgleichgewicht) oder weit davon entfernt (dissipative Struktur im engeren Sinne) befindet. In beiden Fällen sind Störungen des Gleichgewichts mit Abweichungen vom jeweiligen Extremalwert verbunden, sie werden daher zurückgebildet und vergessen. Darin kommt die Stabilität dieser Gleichgewichtszustände zum Ausdruck.

Die Unabhängigkeit des Gleichgewichtszustands vom Anfangszustand, aus dem heraus er sich in den Gleichgewichtszustand entwickelte, ist nicht nur für das thermische Gleichgewicht, sondern auch für das Fließgleichgewicht charakteristisch. Während jedoch Gleichgewichts- und Fließgleichgewichtsstrukturen eindeutig bestimmt sind, können für Systeme fern vom thermischen Gleichgewicht verschiedene Strukturen auftreten. Die einfachsten werden im Phasenraum durch einen Grenzpunkt oder einen Grenzykel (entsprechend einer geschlossenen Kurve im Phasenraum) repräsentiert. (Grenzpunkt und –zykel entsprechen mathematisch gesehen einem Attraktor.)

#### 4. Ausblick

Die Diskussion dissipativer Strukturen erlaubt es, physikalische Betrachtungen enger an tatsächlich vorgefundene Gegenstände des Alltags heranzuführen. Eine reibungsfreie reversible Physik bleibt demgegenüber auf Aspekte einer idealisierten Scheinwelt beschränkt, von der ein direkter Transfer auf die Wirklichkeit nur in trivialen Fällen gelingen kann.

Sicherlich ist die Einbeziehung von Reibung bzw. Dissipation mit einer Zunahme an Komplexität und höheren Anforderungen an die Schüler verbunden. Diese werden aber durch den eingangs genannten lerntheoretischen Vorteil einer größeren Wirklichkeitsnähe einerseits und durch die ausnutzbaren Analogien zum thermischen Gleichgewicht andererseits zumindest teilweise wieder aufgehoben. Außerdem ist die quantitative Beschreibung des Systems in stationären Zustand nicht schwieriger als die Beschreibung des Verhaltens reibungsfreier Vorgänge, wie gleichförmige Bewegungen und ungedämpfte Schwingungen. Denn bekanntlich lassen sich mechanische dissipative Systeme durch Einführung von Reibungskräften ins Konzept der Newtonschen Mechanik übertragen und bei Realisierung des stationären Zustands gleichsam kräftefrei behandeln. Aus dieser Weise kann die reibungsfreie Mechanik auch die technisch wichtigen stationären Vorgänge erfassen, was einer der Gründe ihres Erfolges sein dürfte. Doch eine derartige „Newtonsche“ Konzeption von Reibung – konstruiert vor dem Hintergrund des reibungsfreien Falles – können Schüler u. E. nur dann sinnvoll nachvollziehen, wenn davon Abstand genommen wird, der reibungsfreien Physik eine Realität zuzuordnen, von der sich die erlebte Welt praktisch nur durch prinzipiell vernachlässigbare Reibungseffekte unterscheidet: Reibung ist nicht einfach ein „Dreckeffekt“, sondern ein konstruktives Element unserer Wirklichkeit. Dieses sollte – wenigstens exemplarisch – auch im Schulunterricht zum Ausdruck kommen.

#### Literatur:

- I. PRIGOGINE, I. STENGERS: Dialog mit der Natur. München: Piper 1980-
- H. J. SCHLICHTING, U. BACKHAUS: Physik des Alltags am Beispiel der Energetik des Fahrrads. technic-didact 1983a (im Druck)
- H. J. SCHLICHTING: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983b.
- C. F. v. WEIZÄCKER: Die Tragweite der Wissenschaft. Stuttgart: Hirzel 1966.