

Die Unumkehrbarkeit natürlicher Vorgänge – Phänomenologie und Messung als Vorbereitung des Entropiebegriffs

Udo Backhaus und Hans Joachim Schlichting

(aus: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht **34/3**, 153 (1981))

Es wird eine Möglichkeit aufgezeigt, die breite lebensweltliche Basis des Entropieprinzips, die sich z. B. in der Unumkehrbarkeit (Irreversibilität) solcher Vorgänge wie Lösen von Zucker in Tee oder Ausströmen von Luft aus einem Reifen manifestiert, zum Ausgangspunkt der Entropieeinführung zu wählen. Dadurch wird es möglich, die Entropie qualitativ bereits in der Sekundarstufe I zu behandeln. Sie eröffnet dort zusammen mit dem Energiebegriff den Weg zum Verständnis vieler Probleme der „Energie“- und Umweltkrise.

1 Einleitung

Der Physikunterricht kann u. E. nur dann seiner Aufgabe, zur Handlungsfähigkeit der Schüler in der wissenschaftlich-technischen Welt beizutragen, gerecht werden, wenn die physikalischen Begriffe nicht parallel zu entsprechenden lebensweltlichen eingeführt, sondern – wenn möglich – aus diesen entwickelt werden. Nur so kann man der Gefahr entgegen, dass die „Welt der Physik“ von den Schülern als etwas von der Lebenswelt Getrenntes wahrgenommen wird.

Besonders deutlich wird die Diskrepanz zwischen lebensweltlichen und physikalischen Konzepten am Beispiel von Energie und Entropie.

Vorwissenschaftlich wird mit der Energie neben der Vorstellung, dass Energie nicht aus dem Nichts erzeugt werden kann, vor allem die Vorstellung verbunden, dass Energie verbraucht wird. Anstatt beide – gewissermaßen komplementären – Aspekte aufzugreifen und nach Beschreibungsmöglichkeiten zu suchen, wird in Schulbüchern i. A. lediglich der Erhaltungsgesichtspunkt hervorgehoben, der mindestens ebenso auffällige Verbrauchsaspekt aber zurückgedrängt. Das Verständnis des durch Verbrauch, Verknappung und wachsende Kosten gekennzeichneten lebensweltlichen Energiebegriffs wird dadurch geradezu blockiert und dem Eindruck der Weltfremdheit der Physik Vorschub geleistet.

Die Suche nach einer Beschreibungsmöglichkeit für den Energieverbrauch führt zum Entropiebegriff. Das Entropieprinzip wird daher zuweilen auch als das „Prinzip der Entwertung der Energie“ bezeichnet, obwohl dieser Ausdruck nicht die ganze Bedeutung dieses Prinzips umreißt. Die hervorragende Stellung der Entropie unter den physikalischen Größen beruht vor allem auf ihrer Änderung bei irreversiblen Prozessen, erlaubt diese

Eigenschaft doch die Vorhersage von Entwicklungsrichtungen und die Bestimmung von Gleichgewichten.

Trotz dieser Bedeutung und trotz der Fülle vertrauter Erscheinungen in der Lebenswelt, die mit Hilfe der Entropie beschrieben werden, wird sie in den Schulbüchern der Sekundarstufe I i. A. nicht einmal erwähnt.

In Schulbüchern der Sekundarstufe II tritt sie allenfalls am Rande der Wärmelehre auf, die oft selbst nur als Randgebiet der Mechanik erscheint. Die Entropie bildet so den Schlusspunkt thermodynamischer Betrachtungen, anstatt den Ausgangspunkt der Beschreibung und Untersuchung der verschiedensten Phänomene zu bilden.

Hinzu kommt, dass die Entropie i. A. bei der Untersuchung des Carnot'schen Kreisprozesses auf eine Weise eingeführt wird, die nicht nur völlig verschieden ist vom üblichen Verfahren zur Einführung physikalischer Größen [1, S. 219], die darüber hinaus die Entropie zu einer sehr speziellen, unanschaulichen Größe macht, deren Bezug zu vertrauten Phänomenen sich nicht einmal andeutet.

Ziel dieser und einer folgenden Arbeit [2] ist das Aufzeigen der Möglichkeit, die Entropie zu einer anschaulichen (Grund-) Größe zu machen, wenn als Ansatzpunkt die alltägliche Erfahrung gewählt wird, dass alle natürlichen Vorgänge unumkehrbar (irreversibel) sind, dass also z. B. Vorgänge wie

- das Ausströmen von Luft aus einem Fahrradschlauch,
- das Auflösen von Zucker in Kaffee oder
- das Verbrennen von Holz zu Rauch unter der Erwärmung der Umgebung

nicht „von allein“ in umgekehrter Richtung ablaufen. Die bei genauerer Untersuchung sich zeigende unterschiedliche Stärke der Irreversibilität initiiert dann die Suche nach einem Maß für diesen Umstand, an deren Ende die Einführung der Entropie steht, die gerade so definiert wird, dass ihre Änderung ein Maß für die Irreversibilität von Prozessen ist.

2 Möglichkeiten der Entropieeinführung

2.1 Carnotprozesse idealer Gase

Historisch entwickelte sich der Entropiebegriff insbesondere bei der Untersuchung von Wärmekraftmaschinen und ihres Wirkungsgrades. Neben der statistischen Behandlung scheint das bis heute der einzige Weg zu sein, der für die Schule erwogen wird. Dabei wird ausgehend von der quantitativen Untersuchung des Carnotprozesses eines idealen Gases festgestellt, dass für beliebige reversible Kreisprozesse gilt:

$$\oint \frac{dQ}{\theta} = 0, \quad \theta \text{ Temperatur (ideales Gas),}$$

und zwar unabhängig von der Arbeitssubstanz. Die durch

$$dS := \frac{dQ_{rev}}{\theta}$$

definierte Größe ist also eine Zustandsgröße, d. h. allein abhängig vom Zustand eines Systems, nicht aber von seiner „Geschichte“.

Die Untersuchung irreversibler Kreisprozesse führt anschließend auf die Clausius'sche Ungleichung

$$\frac{dQ}{\theta} < 0$$

und damit auf das Entropieprinzip für adiabatisch abgeschlossene Systeme (siehe z. B. [3]). Die späte Behandlung und schwere Verständlichkeit dieses Vorgehens beruhen teilweise auf dem Umfang des notwendigen Vorwissens. Bei der Argumentation wird nämlich Gebrauch gemacht u. A. von folgenden Gesetzmäßigkeiten:

- 1. Hauptsatz der Thermodynamik,
- Abhängigkeit der inneren Energie idealer Gase von der Temperatur,
- Gleichung reversibler Adiabaten idealer Gase,
- $\int \frac{1}{x} dx = \ln x$,
- 2. Hauptsatz der Thermodynamik in der Formulierung von Clausius.

2.2 Vergleich Wasserkraftwerk – Wärmekraftwerk

In letzter Zeit wurde der Versuch Karlsruher Didaktiker veröffentlicht, das unter 2.1 beschriebene Vorgehen für die Schule didaktisch aufzubereiten [4]. Dabei wird vorgeschlagen, die Entropie aufgrund der Analogie zwischen Wasserkraftwerk und Wärmekraftwerk als das zu veranschaulichen, was im Falle der Wärmeübertragung mit der Energie zwischen Kraftwerk und Umgebung ausgetauscht wird.

Zwar umgeht dieser Ansatz einige der unter 2.1 genannten Schwierigkeiten, allerdings auf Kosten einer gewissen Unschärfe und Willkürlichkeit der Argumentation [5]. Insbesondere wird auch hier die Entropie als Erhaltungsgröße bei reversiblen Prozessen eingeführt. Ihre große Bedeutung wird so geradezu verschleiert – schließlich ist doch die Vorstellung eines Entropieflusses im Falle irreversibler Prozesse, bei denen also Entropie erzeugt wird, zumindest problematisch.

2.3 Neuere theoretische Ansätze

Auf der Suche nach Möglichkeiten zur Umgehung dieser Schwierigkeiten stießen wir auf neue theoretische Ansätze, die bisher anscheinend kaum Einfluss auf die didaktische Diskussion gewonnen haben. Grundlage aller dieser Ansätze ist eine Arbeit von CARATHÉODORY [6], in der die Möglichkeit aufgezeigt wird, aufgrund einer stark verallgemeinerten Erfahrung (Carathéodory-Axiom) Entropie und absolute Temperatur gleichzeitig zu definieren. Wegen des hohen Abstraktionsgrades wurde die Bedeutung der Arbeit zunächst nur von wenigen Physikern erkannt (s. insbesondere [1]). Das änderte sich erst, als es gelang, die Argumentation durch Verringerung des mathematischen Anspruchsniveaus durchsichtiger zu machen. So wählt z. B. BUCHDAHL ([7], [8], [9]) als Ausgangspunkt

die Erfahrung, dass man ein adiabatisch abgeschlossenes System (z. B. Wasser in einer Thermosflasche) zwar erwärmen (z. B. durch eine eingeschmolzene Heizspirale), nicht aber abkühlen kann, ohne die äußere Gestalt des Gefäßes zu verändern. Die durch diese Nichterreichbarkeit gewisser Endzustände von bestimmten Anfangszuständen gegebene »Reihenfolge« zwischen den Zuständen eines adiabatisch abgeschlossenen Systems wird dann beschrieben durch eine Funktion, deren Charakteristikum gerade das Anwachsen bei einem Prozess ist, von dessen Endzustand der Anfangszustand nicht mehr erreicht werden kann, ohne die adiabatische Wand mindestens zeitweise zu öffnen, d. h. für Wärme durchlässig zu machen.

Bei dieser Einführung geht man zwar von dem Anwachsen der Entropie bei den irreversiblen Prozessen eines wärmemäßig abgeschlossenen Systems aus, jedoch ist der Zusammenhang mit der ständig beobachtbaren Unumkehrbarkeit beliebiger „spontaner“ Vorgänge nicht unmittelbar zu sehen.

2.4 Begründung des gewählten Vorgehens

Den höchsten Grad der Formalisierung besitzt die Theorie von GILES [10]. Die Analyse zeigt jedoch, dass diese Theorie den beschriebenen Intentionen bei einer Entropieeinführung am besten angepasst werden kann. Die Grundlage der Argumentation bildet nämlich folgende Erfahrung:

Nicht nur sind alle in der Natur vorkommenden Prozesse unumkehrbar in dem Sinne, dass sie nicht rückgängig gemacht werden können, ohne dass insgesamt eine Veränderung in der Welt zurückbleibt; sie sind sogar verschieden irreversibel, was sich insbesondere darin äußert, dass sie während ihres Ablaufens andere Prozesse zurückspulen, d. h. dazu veranlassen können, entgegen der natürlichen Richtung abzulaufen. So kann man z. B.

- mit einem ausströmenden Luftballon einen anderen zum Teil aufblasen,
- durch Dissipation mechanischer Energie Temperaturunterschiede herstellen oder
- durch einen Lösungsvorgang in einer osmotischen Zelle einen Druckunterschied erzeugen.

Diese Erfahrungen bilden den Ausgangspunkt für die Konstruktion eines Irreversibilitätsmaßes: Von zwei Prozessen wird derjenige als irreversibler bezeichnet, der in der Lage ist, den anderen zurückzuspulen. Der darauf aufbauende quantitative Begriff der Unumkehrbarkeit von Prozessen wird schließlich beschrieben durch das Anwachsen einer Zustandsfunktion – der Entropie.

Mit diesem Ansatz ist es möglich, von alltäglichen Phänomenen auszugehen, zu deren Beschreibung die Entropie mit ihrer wesentlichen Eigenschaft konstituiert wird. Darüber hinaus hat dieses Vorgehen weitere Vorteile:

1. Der Ansatz kann relativ leicht so umformuliert werden, dass die Einführung des Irreversibilitätsmaßes einem üblichen Verfahren zur Definition einer Grundgröße durch Festlegung eines Messverfahrens entspricht. Ein Teil der Schwierigkeiten beim Verständnis der Entropie hat sicher seinen Grund darin, dass sich das Verfahren zu ihrer Einführung grundsätzlich vom bis dahin bekannten Vorgehen bei der Definition physikalischer Größen unterscheidet.

2. Ein derartiges Entropiekonzept ist starker Elementarisierung fähig: Es kann bereits in der Sekundarstufe I qualitativ behandelt werden und erlaubt eine schrittweise Vertiefung bis hin zur exakten Quantifizierung in der Sekundarstufe II.

Die folgenden Argumentationen bauen auf dieser Grundlage auf. Bei der schrittweisen Präzisierung der Erfahrung, die zum Entropiebegriff führen, werden wir zunächst vorwiegend qualitativ vorgehen und damit eine Möglichkeit entwickeln, die Entropie auf der Sekundarstufe I zu behandeln. Die darauf basierende quantitative Fassung ist allerdings relativ einfach [2].

Wir hoffen den einen oder anderen Leser in seinem aufgrund der eigenen Ausbildung entwickelten Vorurteil schwankend zu machen, Entropie sei eine abstrakte und unanschauliche Größe, ihre Behandlung an der Schule deshalb selbst in der Sekundarstufe II schwierig – wenn nicht unmöglich.

Das vorgeschlagene Vorgehen entspricht dem unserer Meinung nach der Schule angemessenen Verfahren zur Einführung von Grundgrößen [11]: Zunächst wird ein Überblick über die zu beschreibenden Phänomene gegeben. Die Suche nach einem Messverfahren führt dann zu einer schrittweisen Verschärfung der benutzten Begriffe. Der zunächst unscharfe Eindruck der Unumkehrbarkeit wird dabei schließlich so präzisiert, dass die „Irreversibilität eines Prozesses“ genau dasselbe bedeutet wie für den Physiker die mit dem Prozess verbundene Entropieänderung.

3 Phänomenologie und qualitative Einführung

Einen naheliegenden Anknüpfungspunkt für die Behandlung der Entropie bildet die Erarbeitung eines allgemeinen, d. h. über die Mechanik hinaus Bedeutung besitzenden Energiekonzeptes [12]. Wie bereits angedeutet, manifestiert sich die Energie in einer Vielzahl von Erscheinungen nicht nur durch ihre Eigenschaft, bei allen Vorgängen erhalten zu bleiben, sondern auch durch ihre Tendenz zur „Entwertung“.

Dieser Ausgangspunkt verdeutlicht einen interessanten Gesichtspunkt, dem bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird: Energie und Entropie beschreiben gewissermaßen verschiedene Aspekte derselben Phänomene. Dieser Umstand macht die unabhängige Einführung der beiden Begriffe so schwierig, eigentlich aber auch gar nicht wünschenswert. In theoretischen Arbeiten äußert er sich darin, dass die Definition beider Größen im wesentlichen auf denselben Grundaussagen beruhen (siehe z. B. [10]).

Bei der Energieeinführung – insbesondere bei der Behandlung des Energietransportes – zeigt sich, dass alle Vorgänge von selbst nur in einer Richtung ablaufen bzw., wenn sie zurücklaufen, dieses nur unvollständig tun. Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, dass bei dem Transport ein Teil der Energie in Formen übergegangen ist, die nicht ohne weiteres wieder in die Ausgangsform umgewandelt werden können. Dass diese Formen, insbesondere die Abgabe von Wärme an die Umgebung, der Aufmerksamkeit leicht entgehen, liegt an ihrer Unauffälligkeit: So sind z. B. die durch Reibung auftretenden Temperaturerhöhungen häufig sehr gering. Wenn man in diesem Zusammenhang von Verbrauch und Entwertung spricht, so ist damit nicht quantitative Energieeinbuße gemeint – die Gesamtenergie ist quantitativ erhalten geblieben – sondern die Tatsache, dass man wegen der qualitativen Veränderungen während des Prozesses anschließend mit der Energie nicht mehr dasselbe

anfangen kann wie vor dem Prozess: So kann man z. B. mit der bei einem „ungenutzte“ Wasserfall auftretenden geringen Erwärmung offenbar praktisch nichts mehr anfangen. Die Suche nach Ansätzen zur Objektivierung führt schließlich zu folgendem vorläufigen Ergebnis:

Anzeichen für die Energieentwertung bei einem Prozess ist die Unmöglichkeit, den Anfangszustand wieder herzustellen.

Dieser Satz deutet an, dass sich der Schwerpunkt der Diskussion zu verschieben beginnt von der Energiebehandlung auf eine allgemeinere Betrachtung von Prozessen. Dieser Gewichtsverlagerung kann Rechnung getragen werden durch folgende Formulierung (vgl. auch PLANCK [13, S. 83]):

Natürliche Prozesse heißen unumkehrbar (irreversibel), wenn sie nicht rückgängig gemacht werden können, ohne dass eine andere Veränderung zurückbleibt.

Bei der Suche nach einem Maß für diese Eigenschaft natürlicher, d. h. „von selbst“ ablaufender Prozesse zeigt sich, dass solche Prozesse im täglichen Leben sehr wohl entgegen der „natürlichen“ Richtung ablaufen:

- Ständig treten neue Temperaturunterschiede auf, obwohl sie doch „dazu neigen“, sich auszugleichen,
- Wasser sammelt sich in Wolken, obwohl es „eigentlich runterfallen will“,
- schwere Gegenstände gelangen an höhere Stellen, obwohl sie „allein runterfallen würden“.

Gleichzeitig damit laufen aber immer andere Prozesse in ihrer „natürlichen“ Richtung ab:

- „Verbrauch“ von elektrischer Energie oder Temperaturannäherung zwischen anderen Körpern,
- „Verbrauch“ von Sonnenenergie,
- „Verbrauch“ von elektrischer Energie (Kran) oder Absinken anderer Gewichtsstücke (Flaschenzug).

Zutreffender wäre es also, davon zu sprechen, dass die Prozesse durch andere zurückgespult werden. Diese Beobachtungen legen es nahe, als Maß für die Unumkehrbarkeit von Prozessen die Fähigkeit zu wählen, andere Vorgänge zurückzuspulen:

Von zwei natürlichen Prozessen ist derjenige stärker irreversibel, der den anderen zurückspulen kann.

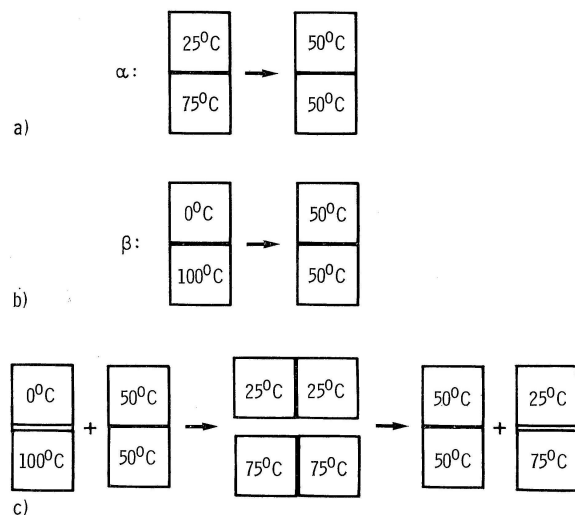


Abbildung 1: a) Prozess α : Temperaturausgleich zwischen gleichen Körpern mit den Anfangstemperaturen $\vartheta_h = 75^\circ\text{C}$ und $\vartheta_k = 25^\circ\text{C}$. b) Prozess β : Temperaturausgleich zwischen gleichen Körpern mit den Anfangstemperaturen $\vartheta_h = 100^\circ\text{C}$ und $\vartheta_k = 0^\circ\text{C}$. c) β kann α zurückspulen.

Beispiel: Temperaturausgleich

Wir betrachten folgende Prozesse α und β mit gleichen Körpern unterschiedlicher Temperatur (z. B. gleichen Mengen Wassers): α : Temperaturausgleich zwischen 25°C und 75°C (Abb. 1a), β : Temperaturausgleich zwischen 0°C und 100°C (Abb. 1b). Dass β stärker irreversibel ist als α , kann man folgendermaßen zeigen (Abb. 1c): Geht man vom Anfangszustand von β und vom Endzustand von α aus, so kann man, wenn man zunächst Ausgleich stattfinden lässt, zwischen 0°C und 50°C und zwischen 50°C und 100°C und anschließend einmal zwischen 25°C und 75°C den Endzustand von β und den Anfangszustand von α herstellen, ohne eine weitere Veränderung der Welt. β hat also α während seines Ablaufs zurückgespult.

Bevor dieser Ansatz weiter präzisiert und auf den Vergleich spezieller Prozesse angewendet wird, sollte klargemacht werden, dass durch die Beschäftigung mit der Fähigkeit zum gegenseitigen Zurückspulen ein wesentlicher Aspekt allen physikalischen Geschehens erfasst wird: An vielen Beispielen kann man sich klarmachen, dass die Nützlichkeit aller Maschinen gerade darin liegt, dass man damit Prozesse entgegen ihrer natürlichen Richtung ablaufen lassen kann, allerdings auf Kosten des natürlichen Ablaufes anderer Prozesse:

- Ein Elektroherd stellt Temperaturunterschiede her auf Kosten des „Verbrauches“ elektrischer Energie.
- Bei einem Heizungssystem werden Temperaturunterschiede durch Wärmeleitung hergestellt.

- Eine Batterie erzeugt elektrische Energie aufgrund des Ablaufes einer chemischen Reaktion.
- Einen Wasserfall kann man benutzen, um viele Prozesse zurückzuspulen: Man kann mit ihm z. B. elektrische Energie erzeugen und ihn zum Hochpumpen anderen Wassers verwenden (Speicherkraftwerk).

Bei der Beschäftigung mit dem Zurückspulen bleibt also die ursprüngliche Intention, ein Maß für den Wert oder die Nützlichkeit zu finden (jetzt allerdings von Zustandsänderungen), im Blick.

Darüber hinaus können erste Einsichten vermittelt werden in den folgenden allgemeinen Satz:

Grundlage allen Geschehens und Lebens ist die Tatsache, dass irreversible Prozesse bei ihrem Ablauf „Umwege machen“, d. h. andere natürliche Prozesse zurückspulen.

Die heiße und gerichtete Sonnenstrahlung wird zum Teil nicht direkt als diffuse kalte Strahlung in den Weltraum zurückgeworfen, sondern bewirkt zwischendurch z. B.

- Herstellung organischer Substanzen durch Photosynthese,
- Entstehung von Temperaturdifferenzen auf der Erde,
- Verdunstung von Wasser und damit Wolkenbildung.

Organische Substanzen zerfallen zum Teil nicht direkt, sondern auf dem Umweg der Herstellung von Kohle.

Temperaturdifferenzen gleichen sich nicht direkt aus, sondern bewirken Druckunterschiede und als Folge davon die Entstehung von Winden.

Regenwasser fällt nicht sofort in die Ozeane, sondern zum Teil erst auf Berge, so dass die weitere Bewegung genutzt werden kann.

4 Erste Präzisierung

4.1 Messverfahren für die Irreversibilität

Nachdem auf diese Weise der Rahmen der beschreibbaren Phänomene umrissen worden ist, kann ein Messverfahren vereinbart werden, in dem festgelegt wird, wie die Unumkehrbarkeit zweier Prozesse quantitativ verglichen werden soll. Entsprechend dem bisher benutzten Argumentationsniveau sollte das zunächst noch relativ unscharf formuliert werden. Folgende Festlegungen liegen nahe:

1. Gleichheit der Irreversibilität

Zwei natürliche Prozesse α und β heißen gleich irreversibel, wenn sie sich gegenseitig zurückspulen können.

2. Vielfachheit der Irreversibilität

Ein natürlicher Prozess α heißt doppelt so irreversibel wie ein natürlicher Prozess β , wenn α den Prozess β zweimal zurückspulen kann und wenn umgekehrt β zweimal ablaufen muss, um α zurückspulen zu können.

Bekanntlich beinhaltet jede Festlegung eines Messverfahrens bereits Aussagen über die Natur (siehe z. B. CARNAP [14], der zwischen konventionellen und nicht konventionellen Aspekten von Messverfahren unterscheidet). Den empirischen Aspekt obiger Festlegung bildet insbesondere folgender Umstand: Das Messverfahren ist offenbar nur dann universell anwendbar, wenn alle natürlichen Prozesse in der beschriebenen Weise miteinander verglichen werden können, wenn also von zwei beliebigen natürlichen Prozessen mindestens einer den anderen zurückspulen kann. Dass die Natur diese Voraussetzung erfüllt, kann zunächst an Beispielen (Temperaturausgleich s. o., »Dissipation mechanischer Energie« s. u.) und schließlich dadurch veranschaulicht werden, dass gezeigt wird, dass mit allen irreversiblen Prozessen mechanische Energie »erzeugt« werden kann (vgl. 4.2) und dass umgekehrt mit mechanischer Energie Prozesse jeder Art zurückgespult werden können.

Bevor ein allgemeiner Vergleichsprozess festgelegt wird, d. h. ein Prozess, dem die „Einheitsirreversibilität“ zugeordnet wird, sollte das Messverfahren an einfachen Beispielen durchgespielt und einige allgemein Folgerungen gezogen werden, damit eine begründete Auswahl der Einheit getroffen werden kann.

1. Das Messverfahren soll zunächst erläutert werden an einem Beispiel, das insofern überraschend ist, als es scheinbar rein mechanisch ist:

Sei α der Prozess „Herunterfallen (und Liegenbleiben) eines Gewichtsstückes der Masse $m = 1\text{kg}$ aus einer Höhe von 1m “ (Abb. 2a). Der Prozess β unterscheide sich von α nur durch die kleinere Masse $m = 0,4\text{kg}$ (Abb. 2b).

- (a) Beide Prozesse sind offenbar irreversibel: Sie laufen täglich ab, niemals aber von allein in der umgekehrten Richtung.
- (b) Mit Hilfe eines Hebels sieht man, dass α β zurückspulen kann, also stärker irreversibel ist (Abb. 2c).
- (c) Bei Verwendung eines ungleicharmigen Hebels erkennt man, dass α gar nicht ganz ablaufen muss um das kleine Gewichtsstück zu heben, dass man α also noch weiter nutzen kann. Genauere Untersuchung zeigt, dass mit dem großen Gewichtsstück das kleinere sogar zweimal gehoben werden kann, α also mindestens doppelt so irreversibel ist wie β (Abb. 2d).
- (d) Der nächste Schritt zeigt nun umgekehrt, dass das große Gewichtsstück gehoben werden kann, wenn das kleine „dreimal runterfällt“, dass also α weniger als dreimal so irreversibel wie β ist (Abb. 2e).
- (e) Weitere Vergleiche führen mit geringfügiger Idealisierung zu dem Ergebnis, dass α genau $\frac{5}{2}$ mal so irreversibel ist wie β (Abb. 2f).
- (f) Dieses Ergebnis kann offenbar verallgemeinert werden:
Für Prozesse wie α und β ist die Irreversibilität proportional zur „verlorenen“ mechanischen Energie.
(Dieser Satz wird später präzisiert!)

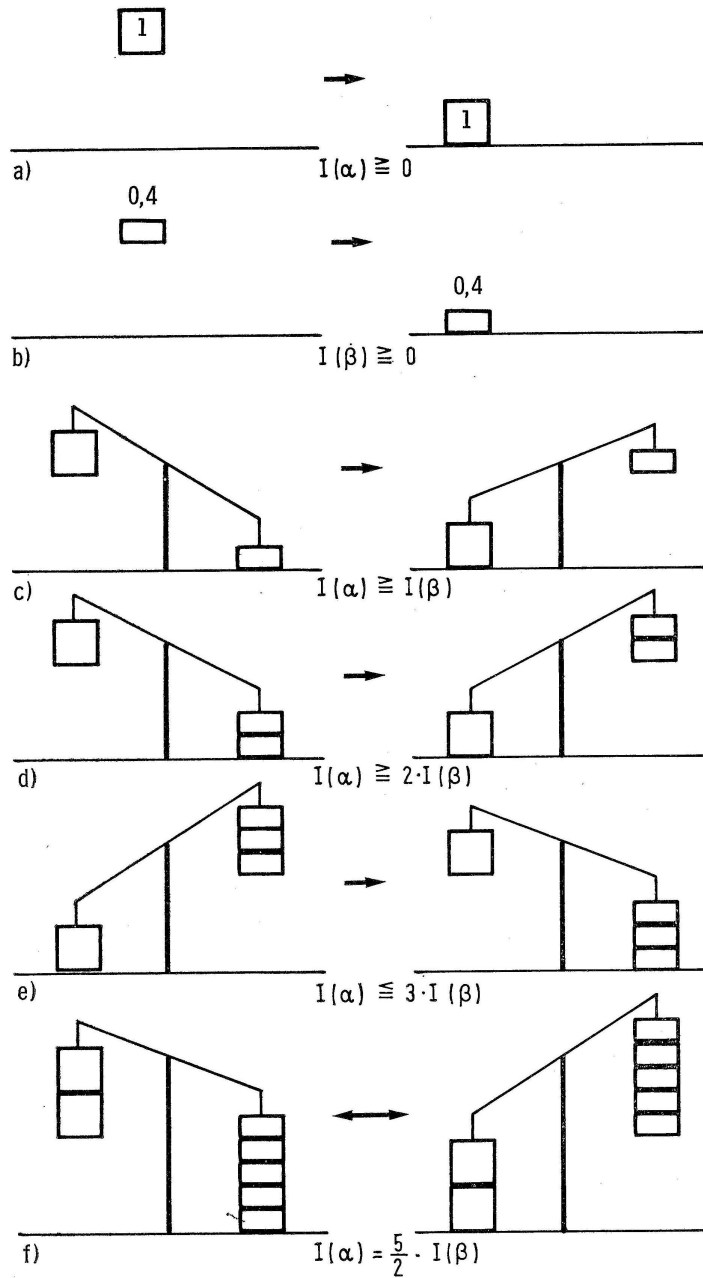


Abbildung 2: Irreversibilitätsvergleich für zwei Prozesse der Art „Verbrauch“ von mechanischer Energie“

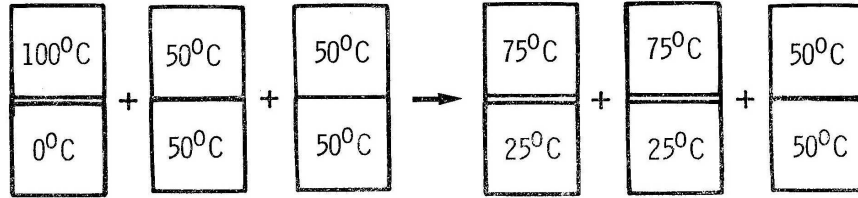


Abbildung 3: Der Temperatenausgleich zwischen $\vartheta'_h = 100^\circ\text{C}$ und $\vartheta'_k = 0^\circ\text{C}$ kann den zwischen $\vartheta_h = 75^\circ\text{C}$ und $\vartheta_k = 25^\circ\text{C}$ zweimal zurückspulen.

Dass dieses Beispiel rein mechanisch aussieht, liegt natürlich an der noch ungenügenden Schärfe der Begriffe: Die dissipierte Energie bleibt noch außer Betracht.

2. Typischer für die Thermodynamik ist das Beispiel der Wärmeleitung. Es ist dafür komplizierter, so dass nur die ersten beiden Schritte des Vergleichs besprochen werden können:

Seien α und β die früher (Abb. 1) definierten Temperatenausgleichsvorgänge zwischen ansonsten gleichen Körpern. Die zu Abb. 1c gehörende Argumentation zeigte bereits, dass β stärker irreversibel ist als α .

Dass β sogar mindestens doppelt so irreversibel ist wie α , kann man sich folgendermaßen klarmachen (Abb. 3): Geht man von einem Zustand aus, der aus dem Anfangszustand von β und zweimal dem Endzustand von α besteht, führt einen Temperatenausgleich zwischen 100°C und 50°C und zwischen 0°C und 50°C durch und lässt zwei Körper mit der Temperatur 50°C unverändert, so stellt sich ein Zustand ein, der aus dem Endzustand von β und zweimal dem Anfangszustand von α besteht. Man kann also sagen: β hat α zweimal zurückgespult.

Hier zeigt es sich zum ersten Mal, dass es bei der Irreversibilitätsmessung nur einen Vergleich von Anfangs- und Endzuständen ankommt, nicht aber auf den „Weg“ dazwischen: Anfangs- und Endzustand sind so, als hätte β α zweimal zurückgespult – und nur darauf kommt es an.

Für eine weitere Abschätzung (β ist etwa viermal so irreversibel wie α) sind kompliziertere Experimente nötig, die im Prinzip darauf hinauslaufen, mit α eine Wärmekraftmaschine zu betreiben, die ihrerseits mit einer Wärmepumpe den erforderlichen Temperaturunterschied herstellt. Das ist natürlich in dieser Phase nicht möglich.

Anhand solcher Beispiele wird deutlich, dass der Irreversibilitätsvergleich darauf hinausläuft, Prozesse mit Hilfe des Vergleichsprozesses „reversibel“ zu machen: Die Messung ist nämlich beendet, wenn ein Prozess gefunden worden ist, der in beiden Richtungen von allein abläuft. Bei der Messung wird also versucht, den Vergleichsprozess so oft wie möglich zurückzuspulen.

Aufgrund des bisher Gesagten bedeutet das:

Die Messung der Irreversibilität eines Prozesses läuft hinaus auf die Bestimmung seiner maximal möglichen Nützlichkeit.

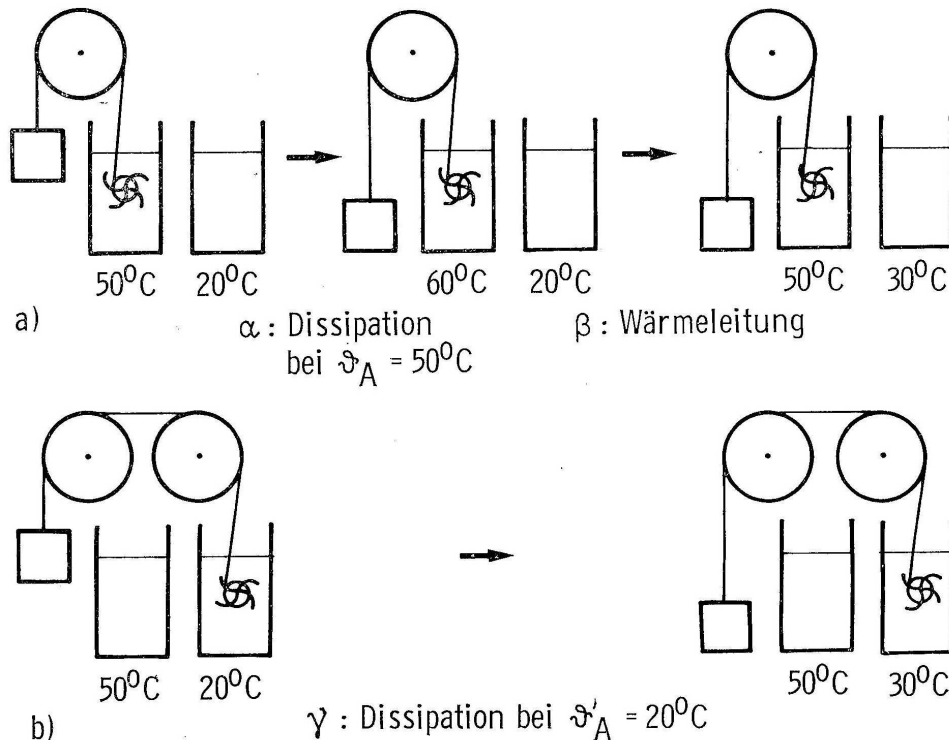


Abbildung 4: Zur Temperaturabhängigkeit der Irreversibilität: γ stimmt in Anfangs- und Endzustand überein mit α gefolgt von β .

Dieser Satz mag zunächst überraschen, assoziiert man doch leicht mit Irreversibilität gerade so etwas wie Verschwendung bzw. nutzlosen Ablauf von Prozessen. Jedoch entspricht die übliche Messung bzw. Berechnung des mit einer Zustandsänderung verbundenen Entropiezuwachses genau obigem Satz: So wird z. B. bei der isenergetischen Expansion eines idealen Gases ein reversibler Ersatzprozess berechnet, der darauf hinausläuft, einen möglichst großen Energiebetrag einem Wärmebad zu entziehen und auf ein mechanisches System zu übertragen, man kann auch sagen, den maximalen Nutzen aus der Expansion zu ziehen.

4.2 Zusammenhang zwischen Irreversibilität und (empirischer) Temperatur

Um Messungen bequem vergleichen zu können, ist es üblich, einen allgemeinen Vergleichsprozess auszuwählen, d. h. eine Einheit zu verabreden. Wenn das an dieser Stelle schon geschehen soll, müssen die Prozesse vorher etwas genauer analysiert werden, damit verständlich wird, warum bei der Auswahl des Vergleichsprozesses ein Temperaturniveau festgelegt werden muss:

Beim Fallen von Gewichtsstücken wird Energie an die Umgebung abgegeben, mit der man anschließend nichts mehr anfangen kann, da sie nicht einmal zu einer Temperaturerhöhung führt. Dass dieser Prozess „isotherme Dissipation mechanischer Energie“ umso

irreversibler ist, je niedriger die Temperatur ist, bei der er stattfindet, kann man sich anhand des folgenden Gedankenexperimentes überlegen (Abb. 4):

Dissipation mechanischer Energie führe zur Erwärmung von 1l Wasser von 50°C auf 60°C . Anschließend Wärmeleitung mit einem weiteren Liter Wasser erwärme diesen von 20°C auf 30°C , so dass am Schluss je 1l Wasser mit der Temperatur 50°C bzw. 30°C vorhanden sind. Derselbe Anfangs- und Endzustand läge vor, wenn die mechanische Energie gleich in dem 20°C warmen Wasser dissipiert worden wäre. Mit anderen Worten: Die Dissipation der mechanischen Energie E bei 50°C (Prozess α), gefolgt von Wärmeleitung zwischen $\vartheta_h = 60^{\circ}\text{C}$ und 20°C (Prozess β), stimmt im Ergebnis überein mit der Dissipation der mechanischen Energie E bei $\vartheta_A = 20^{\circ}\text{C}$ (Prozess γ). Also ist γ so irreversibel wie α und β zusammen. Da aber α und β irreversibel sind, ist also γ stärker irreversibel als α .

Für das Folgende ist es bequem, die Umgebung als Wärmebad, Dissipationen demzufolge als isotherm zu betrachten (dieser Beschreibung entsprechen z. B. alle Reibungsvorgänge, die nur zu vorübergehenden Temperaturerhöhungen führen). Da obige Überlegungen leicht auf solche Prozesse zu übertragen sind, erhalten wir folgendes Ergebnis:

Isotherme Dissipation mechanischer (oder elektrischer) Energie ist umso stärker irreversibel, je niedriger die Temperatur ist, bei der sie stattfindet.

Da eine entsprechende Aussage über Wärmeleitungsvorgänge nicht so leicht einzusehen ist, der Vergleich irreversibler Prozesse mit der Dissipation mechanischer Energie darüber hinaus wesentlich besser als Bestimmung des möglichen Nutzens interpretiert werden kann, scheint es uns sinnvoll, vorläufig folgende Definition zu treffen:

Die Einheit der Irreversibilität wird folgendem Prozess zugeordnet: Dissipation von 1 Joule mechanischer Energie bei der konstanten Temperatur $\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$ (bzw. $\theta = 273\text{K}$).

Diese Wahl der Einheit entspricht absichtlich nicht der üblichen Verabredung ($1\frac{\text{J}}{\text{K}}$), und zwar aus folgenden Gründen:

1. Die Wahl „... Dissipation von 273J ... bei ... $\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$ “ ließe sich an dieser Stelle nicht begründen.
2. Die hier getroffene Festlegung erleichtert eine deutliche Unterscheidung zwischen Idealer- Gas-Temperatur und absoluter (thermodynamischer) Temperatur und verdeutlicht das Einfachheitskriterium bei der endgültigen Wahl (siehe [16]).

Will man also einem Prozess für seine Unumkehrbarkeit eine Zahl zuordnen, dann muss man ihn mit diesem Einheitsprozess vergleichen. Die Messung ist beendet, wenn dieser so oft wie möglich zurückgespult worden ist. Mit anderen Worten (vgl. [15, S. 236ff]):

Die Irreversibilität eines Prozesses ist bestimmt, wenn mit seiner Hilfe der größtmögliche Energiebetrag einem Wärmebad entzogen und auf ein mechanisches System übertragen worden ist.

5 Zusammenfassung

Der letzte Satz macht deutlich, dass mit der Irreversibilitätsmessung genau der gewünschte Aspekt der Phänomene erfasst wird: Äußerte sich die Entwertung der Energie zunächst insbesondere im Verschwinden leicht verwendbarer Energieformen (mechanischer bzw. elektrischer Energie) und im gleichzeitigen Auftreten von Temperaturerhöhungen, so besteht jetzt die Irreversibilitätsmessung genau in der Umkehrung dieses Vorganges. Die ursprüngliche Intention der Beschreibung der Energieentwertung bildete also den Leitfaden für die ganze Entwicklung, so dass das Ergebnis offensichtlich eine – zumindest vorläufige – Lösung des Problems darstellt, ein quantitatives Maß für die Unumkehrbarkeit von Prozessen – und damit für die mit ihnen verbundene Energieentwertung – zu entwickeln.

Literatur

- [1] M. BORN: Kritische Betrachtungen zur traditionellen Darstellung der Thermodynamik. – Phys. Zeitschr. 22 (1921) 219-24, 249-54, 282-6.
- [2] U. BACKHAUS – H. J. SCHLICHTING: Einführung der Entropie als Irreversibilitätsmaß – Begriffsbildung und Anwendung auf einfache Beispiele. – MNU 34/5, 282 (1981).
- [3] L. BERGMANN – CH. SCHÄFER: Lehrbuch der Experimentalphysik. Band I: Mechanik, Akustik, Wärme. 9. Aufl. – Berlin, New York: de Gruyter 1975.
- [4] F. HERRMANN: Entropie in der Schule. Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichtes. Heft 1, S. 29-36. – Hannover: Schroedel 1977.
- [5] U. QUAST: Anmerkungen zu [4]. – Wird veröffentlicht in phys.did.
- [6] S. CARATHÉODORY: Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik. – Math. Ann. 67 (1909) 355-86.
- [7] H. A. BUCHDAHL: A formal treatment of the Consequences of the Second Law of Thermodynamics in Carathéodory's Formulation. – Z. f. Physik 152 (1958) 425-39.
- [8] H. A. BUCHDAHL: Entropy Concept and Ordering of States. – Z.f. Physik 168 (1962) 316-21, 386-91.
- [9] H. A. BUCHDAHL: Concerning the Absolute Temperature Function. – Am.J.Phys. 41 (1973) 98-103.
- [10] R. GILES: Mathematical Foundations of Thermodynamics. – Oxford: Pergamon 1964.
- [11] U. BACKHAUS – H. J. SCHLICHTING: Vom didaktischen Wert physikalischer Grundgrößen. – Physik und Didaktik 7 (1979) 218-225.
- [12] H. J. SCHLICHTING – U. BACKHAUS: Energie als grundlegendes Konzept. – Physik und Didaktik 7 (1979) 139-152.

- [13] M. PLANCK: Vorlesungen über Thermodynamik. 10.Aufl. – Berlin: de Gruyter 1954.
- [14] R. CARNAP: Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaft. 2.Aufl. – München: Nymphenburger Verlagshandlung 1974.
- [15] M.W. ZEMANSKY: Heat and Thermodynamics. 5.Aufl. – Tokyo etc.: Mc Graw Hill 1968.
- [16] U. BACKHAUS – H. J. SCHLICHTING: Der Zusammenhang zwischen Energie, Entropie und Temperatur. In: A. SCHARMANN (Hrsg.): Vorträge der Frühjahrstagung der DPG 1980. – Gießen 1980.