

Geordnete und ungeordnete Energie

Autor(en): **Grassmann, Peter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **73 (1955)**

Heft 42: **100 Jahre Eidg. Technische Hochschule**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-62003>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La chose qui nous paraît remarquable est qu'il puisse véritablement en sortir à la fois une perspective organisatrice allant des positions élémentaires jusqu'aux plus extrêmes engagements de la géométrie, dans le théorique aussi bien que dans le physique, — et une philosophie répondant à l'idée que nous nous faisons d'une philosophie dialecticienne accompagnatrice.

Est-il permis d'espérer que ces essais et ces résultats pourront être étendus à l'ensemble des mathématiques tout d'abord et à l'ensemble des sciences par la suite? Un pas vers l'élucidation du problème de la méthode tel qu'il se pose dans les sciences modernes serait alors accompli.

Nous sommes loin d'être au bout de la tâche, mais l'espoir d'aboutir ne nous est pas interdit.

Geordnete und ungeordnete Energie

Von Prof. Dr. Peter Grassmann, ETH, Zürich¹⁾

In den ersten zwölf Jahren des Bestehens des Eidgenössischen Polytechnikums, von 1855 bis 1867, lehrte als Professor der Physik *Rudolf Julius Emanuel Clausius*, 1822 bis 1888. Unter den Veröffentlichungen dieses hervorragenden Forschers findet sich eine Studie aus dem Jahre 1850, in der er als erster den 2. Hauptsatz der Thermodynamik formulierte. Von ihm stammt auch der Begriff der Entropie, sowie eine grosse Zahl von Abhandlungen, die er 1859 in seinem Werk «Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie» zusammengefasst hat. Die zweite, umgearbeitete und vervollständigte Auflage kam 1876 in 3 Bänden unter dem Titel «Die mechanische Wärmetheorie» heraus. Im Hinblick auf diese sehr bemerkenswerten Arbeiten, die damals die Erkenntnis über Wesen und Verhalten thermischer Vorgänge grundlegend förderten und sich seit dem Aufkommen der Dampfturbinen in fruchtbarster Weise auf den praktischen Maschinenbau auswirken sollten, dürfte sich eine Betrachtung über den Entropie-Begriff an dieser Stelle rechtfertigen.

Die Redaktion

Ein fliegendes Geschoss ist Träger zweier Energieformen: Erstens nehmen alle seine Moleküle an seiner Bewegung teil, die Summe der entsprechenden kinetischen Energien bildet die kinetische Energie des Geschosses. Als solche kann sie — wenigstens theoretisch — beliebig in irgend eine andere Energie verwandelt werden, z. B. in potentielle Energie, wenn das Geschoss senkrecht nach oben fliegt. Es handelt sich also hierbei sozusagen um eine «frei konvertierbare» Energieform. Dieselben Moleküle führen aber zweitens noch eine Zitterbewegung um ihre Gleichgewichtslage aus. Die Summe der entsprechenden kinetischen Energien entspricht einem Teil — etwa der Hälfte — des Wärmehaltes des Geschosses, also einer Energieform, die nur unter bestimmten Bedingungen und immer nur zum Teil in mechanische Energie gewandelt werden kann, also einer nur bedingt konvertierbaren Energieform.

Dieser grundsätzliche Unterschied der beiden Energieformen — beide letzten Endes gegeben durch die kinetische Energie derselben Moleküle — kann nur davon herrühren, dass im ersten Fall eine *geordnete* Energieverteilung vorliegt, denn jedes Molekül macht die Geschossbewegung mit, bewegt

sich also mit gleicher Geschwindigkeit in der gleichen Richtung wie alle anderen. Die dieser gleichförmigen Bewegung überlagerte thermische Bewegung entspricht jedoch einer durchaus ungeordneten Energieform, ist von Molekül zu Molekül ihrer Richtung wie ihrer Grösse nach regellos verteilt. Könnten wir diese ungeordnete Bewegung ordnen, so liesse auch sie sich restlos in Arbeit verwandeln. Würden beispielsweise die Moleküle eines Gases einem Diktator gehorchen und würde dieser befehlen (Bild 1), dass:

1. die Energie gleichmässig auf alle Moleküle zu verteilen sei;
2. nur noch eine Bewegung senkrecht nach oben und senkrecht nach unten erlaubt sei;
3. keine Energie für Rotation um irgend eine Achse des Moleküls oder für innere Schwingungen verwendet werden dürfe,

so liesse sich die Energie dieses so geordneten Molekülhaufens *restlos* in mechanische Arbeit verwandeln, hätten wir es doch nun mit der kinetischen Energie zweier gegeneinander laufender Molekülhaufen zu tun, die ebenso wie die kinetische Energie zweier fester Körper nicht mehr als «Wärme», sondern als mechanische Energie betrachtet werden muss.

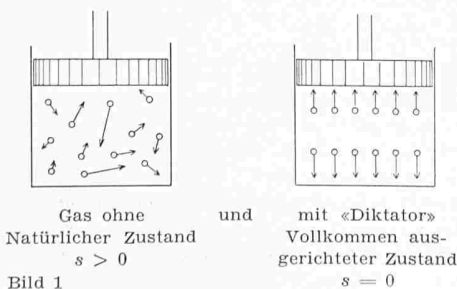
Ganz allgemein muss immer, wenn Arbeit aus Wärme gewonnen werden soll, ein gewisser Ordnungszustand gegeben sein, der höher ist als der mit den gegebenen äusseren Bedingungen verträgliche Zustand maximaler Unordnung. Man sagt meist, damit Wärme in Arbeit verwandelt werden kann, muss ein *Temperaturgefälle* vorliegen. Ein Temperaturgefälle entspricht aber immer einem gewissen Ordnungszustand: Befinden sich doch im Raumteil mit höheren Temperaturen im Mittel die Moleküle mit der grösseren kinetischen Energie, im Raumteil mit der niedrigeren Temperatur die mit der kleineren. Entsprechend dieser *teilweisen* Ordnung kann auch ein *Teil* des Wärmehaltes der betreffenden Körper in Arbeit verwandelt werden.

Soweit wir heute wissen, gilt dies auch für die Welt als Ganzes. Ihr bunter Wandel, Leben und Geschehen ist nur möglich, wenn am Anfang ein Zustand der Ordnung gegeben ist, als erster Schöpfungsakt Licht und Finsternis, Wärme und Kälte geschieden sind. In einer chaotischen Welt ohne Gegensatz ist es nicht einmal mehr sinnvoll, von einem Ablauf der Zeit zu sprechen.

Umgekehrt muss immer Arbeit aufgewendet werden, um den Ordnungszustand zu erhöhen. So bedarf es zur Kompression eines Gases Arbeit, denn dabei werden die vorher auf grossem Raum verstreuten Moleküle in einen kleineren eingeordnet.

Wenn auch die Wärme die wichtigste Form einer ungeordneten Energie darstellt, so ist sie doch nicht die einzige. Auch die elektro-magnetische Strahlung kann als geordnete oder ungeordnete Energie vorliegen, geordnet, wenn einerseits alle Strahlen dieselbe Richtung aufweisen — sie lassen sich dann im Brennpunkt eines Hohlspiegels zu hoher Energiedichte konzentrieren — andererseits, wenn sie gleiche Frequenz und gleichen Phasenwinkel besitzen, eine Bedingung, die erfüllt sein muss, damit die von einer Radiostation ausgehenden Impulse im Empfänger summiert werden können. Vollkommen ungeordnet ist dagegen die elektromagnetische Strahlung im Innern eines allseits von gleichwarmen Wänden umschlossenen Hohlraums. Auch wenn diese Wände

¹⁾ Der vorliegende Aufsatz entspricht bis auf einige geringfügige Änderungen einem Abschnitt aus dem Buch des Verfassers «Physikalische Grundlagen der Chemie-Ingenieur-Technik», das als Band I der Reihe «Grundlagen der Chemischen Technik, Verfahrenstechnik der chemischen und verwandter Industrien» im kommenden Jahr im Verlag H. R. Sauerländer erscheinen wird. Dem Verlag Sauerländer möchten wir auch an dieser Stelle für seine Erlaubnis zur Veröffentlichung danken.



nicht «schwarz» sind, d. h. nicht alle auftretenden Strahlen restlos absorbieren, so senden sie doch als Summe der emittierten und reflektierten Strahlung bald eine Strahlung in den Hohlraum, deren Intensitätsverteilung vollständig der eines schwarzen Körpers bei der betreffenden Temperatur entspricht. Auch ist diese Strahlung gleichmässig auf alle Raumrichtungen verteilt. Sie ist also vollkommen ungeordnet, und tatsächlich liesse sich auch im Innern eines solchen Hohlraumes in keiner Weise die Energie der Strahlung in Arbeit, also in eine vollkommen geordnete Energieform verwandeln.

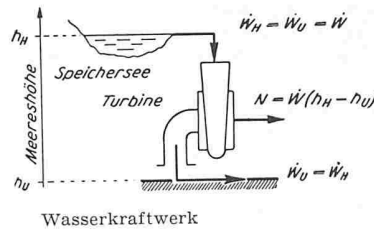
Um die Wandelbarkeit einer Energieform zu beurteilen, das heisst um Thermodynamik zu treiben, müssen wir ein Mass für die Ordnung der betreffenden Energieform kennen. Könnte in irgend einem Körper die ungeordnete thermische Bewegung geordnet werden, ohne dass gleichzeitig irgendwelche Veränderungen in anderen Körpern zurückbleiben, so liesse sich also aus Wärme im vollen Umfang wieder mechanische Arbeit oder elektrische Energie gewinnen. Da sich diese gewollt oder ungewollt über Reibungsvorgänge oder Joulesche Wärme letzten Endes wieder in Wärme verwandeln würde, liesse sich so ein unendlicher Energiekreislauf ohne irgend welche «Energiequellen» verwirklichen. Aus der Tatsache, dass ein solches «perpetuum mobile II. Art» trotz mancher Bemühungen bisher nicht verwirklicht werden konnte, ziehen wir den Schluss, dass es nicht möglich ist, molekulare Unordnung zu verwandeln, ohne dass irgend welche andere Körper bleibende Veränderungen erleiden. Das Günstigste, was wir erreichen können, sind weitgehend reversible Vorgänge, d. h. Vorgänge, die von einem Zustand A über einen anderen Zustand B wieder zum Anfangszustand A zurückführen, ohne dass irgend welche Änderungen an der Umgebung zurückbleiben. Auch diese Vorgänge lassen sich, zumindest bei der normalen Umgebungstemperatur, niemals ganz streng verwirklichen, immerhin aber soweit annähern, dass es auch vom praktischen Standpunkt aus oft sinnvoll ist, sie als erste Näherung an das tatsächliche Geschehen zu betrachten.

Bei einem solchen reversiblen Vorgang muss der Ordnungszustand von Körper plus Umgebung erhalten bleiben. Wäre er nämlich zu irgend einer Zeit höher als am Anfang, so liesse sich damit ein «perpetuum mobile II. Art» verwirklichen. Wäre er aber niedriger, so könnte man ihn von diesem niedrigeren Ordnungszustand rückwärts laufen lassen und könnte dadurch wieder den höheren Ordnungszustand erreichen, und wieder wäre die Möglichkeit eines «perpetuum mobile II. Art» gegeben. Da also in jedem Abschnitt eines reversiblen Prozesses der Gesamtordnungszustand von Körper und Umgebung erhalten bleibt, muss die Unordnung im Körper um denselben Betrag ΔS zunehmen, um den die Unordnung der Umgebung abnimmt.

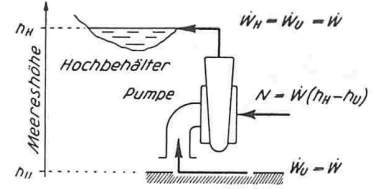
Auf Grund dieser Ueberlegungen kann eine Brücke vom Begriff der «Unordnung» zu den thermodynamischen Zustandsgrössen geschlagen werden. Wird beispielsweise einem Wärmebehälter mit der Temperatur T eine Wärmemenge Q entnommen, so kann bei Umgebungstemperatur T_u daraus bekanntlich mit Hilfe eines Carnotprozesses die Arbeit

$$(1) \quad -A = \frac{Q}{T} (T - T_u)$$

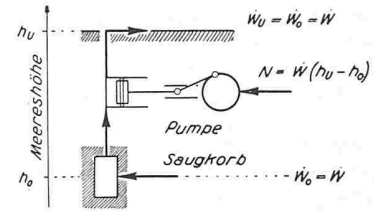
gewonnen werden. Dabei müssen natürlich A und Q in der gleichen Einheit, z. B. in J gemessen werden. Das — Zeichen deutet an, dass es sich um eine vom System geleistete Arbeit handelt. A entspricht mechanischer oder elektrischer Energie, also einer vollkommen geordneten Energieform. Da ferner das



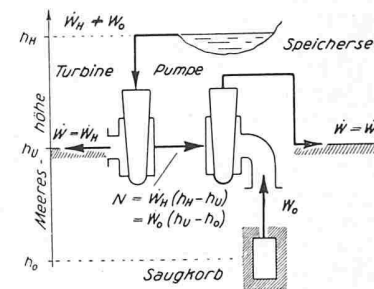
Wasserkraftwerk



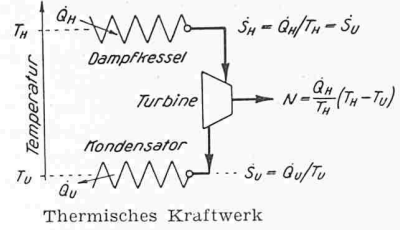
Wasserpumpe



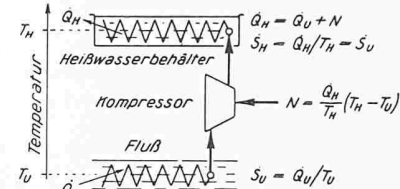
Grundwasserpumpe



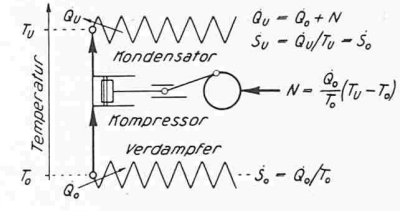
Kombiniertes Wasserkraft- und Pumpwerk



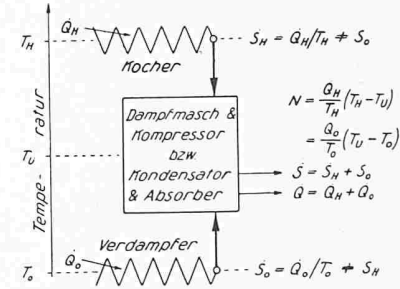
Thermisches Kraftwerk



Wärmepumpe



Reversible Kältemaschine



Kältemaschine, angetrieben von Dampfmaschine bzw. reversible Absorptionsmaschine

Bild 2. Vergleich hydraulischer und thermischer Maschinen
Ableitung der Gleichungen für die reversiblen thermischen Maschinen, aus denen der entsprechenden verlustlosen, hydraulischen Anlage durch Ersatz der Wassermenge W durch die Entropie S
 W = Wassermenge h_H = Höhe des Hochbehälters T_H = Kesseltemperatur
 N = Leistung h_U = Höhe der Umgebung T_U = Umgebungstemperatur
 S = Entropie h_o = Höhe des Grundwasserspiegels T_o = Verdampfertemperatur
Ein Punkt über einer Grösse bedeutet, dass es sich um eine Menge pro Zeiteinheit, d. h. um einen «Strom» handelt.

Arbeitsmittel selbst, das in den Expansionszylinder eingesperre Gas, nach Durchlaufen des vollen Carnotkreislaufs (isothermische Expansion bei T , adiabatische Expansion von $T \rightarrow T_u$, isothermische Kompression bei $T = T_u$ und adiabatische Kompression von $T_u \rightarrow T$) jeweils immer wieder zum Ausgangszustand zurückkehrt, ändern sich seine innere Energie und sein Ordnungszustand periodisch, bleiben also im Zeitmittel konstant. Bezeichnet $-Q_u$ die vom Arbeitsmittel bei $T = T_u$ an die Umgebung abgegebene Wärmemenge, so folgt aus einer Energiebilanz:

$$(2) \quad Q + Q_u + A = 0$$

d. h. die Summe der vom System aufgenommenen Energiebeträge muss gleich Null sein. Elimination von A aus Gl. 1 und 2 ergibt

$$(3) \quad \frac{Q_u}{T_u} + \frac{Q}{T} = 0$$

Das erste Glied entspricht offenbar der Zunahme der Unordnung der Umgebung, die durch die Zufuhr der Wärmemenge Q_u bedingt ist, das zweite Glied der Abnahme der Unordnung des Behälters, dem die Wärmemenge Q entnommen

wird. Beide werden dann einander gleich, wenn als Mass für die Unordnung eine beliebige Funktion $F(Q/T)$ gesetzt wird.

Da wir den Begriff «Unordnung» bisher noch nicht quantitativ definiert haben, steht nichts im Wege, als Definition einzuführen: Zunahme der Unordnung = zugeführte Wärmemenge dividiert durch absolute Temperatur. In der Thermodynamik spricht man jedoch nicht von Unordnung, sondern sagt statt dessen *Entropie*, die mit dem Buchstaben S bezeichnet sei. Ihre Definitionsgleichung lautet also:

$$(4) \quad dS = \frac{dQ_r}{T}$$

(Meist benützt man allerdings Gl. 4 zur Definition der absoluten Temperatur T und definiert die Entropie durch den Logarithmus der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit des betreffenden Zustands.)

Mit dieser Formel lässt sich bei Kenntnis der Zustandsgleichung S als Funktion der Zustandsvariablen ausdrücken. Der Index r an der Wärmemenge dQ soll andeuten, dass Gleichung (4) nur auf reversible Vorgänge angewendet werden darf. Bei irreversiblen Vorgängen ist nämlich eine Erhöhung von S auch ohne Wärmezufuhr möglich. Wird beispielsweise in einem Gefäss ein Rührer bewegt, so setzt sich die zugeführte Arbeit irreversibel in Wärme um, was zu einer Erwärmung und damit trotz $dQ = 0$ zu einer Entropiezunahme des Gefässinhaltes führt.

Am absoluten Nullpunkt ist ein kristallisierter Körper vollständig geordnet, die Atome sitzen fest an ihren Gitterpunkten, die Entropie ist also Null. (Streng genommen gilt dies allerdings nur, wenn der Körper sehr langsam abgekühlt würde, so dass er tatsächlich den $T = 0$ entsprechenden Gleichgewichtszustand angenommen hat.) Wird dem Körper Wärme zugeführt, so wächst auf jeden Fall nach Gl. (1) seine Entropie, die Atome beginnen um ihre Gleichgewichtslage zu schwingen, sie stehen nicht mehr genau in Reih und Glied. Dieser Zunahme der Entropie entspricht meist auch einer Zunahme der Temperatur, jedoch muss das nicht so sein: Am Schmelzpunkt und am Siedepunkt nimmt die Entropie — nicht aber die Temperatur — zu, die zugeführte Wärme wird ausschliesslich dazu verbraucht, den Atomverband in Unordnung zu bringen, ohne dass die mittlere kinetische Energie des Atoms und damit die Temperatur erhöht wird. Typisch ist dabei, dass der Uebergang von der Flüssigkeit in den Dampf bei allen Flüssigkeiten einer etwa gleichen Zunahme der Unordnung entspricht, denn die Verdampfungswärme dividiert durch die absolute Temperatur des normalen Siedepunktes, das ist also die Verdampfungsentropie, ist bei allen sich einigermassen normal verhaltenden Flüssigkeiten nach der Troutonschen Regel von der gleichen Grössenordnung. Mit Annäherung an das ideale Gas ist schliesslich der Zustand grösstmöglicher Unordnung erreicht, jedes Molekül ist vom anderen vollkommen unabhängig.

Meist geht mit der Zunahme der Entropie auch eine Zunahme des Volumens einher: der Körper dehnt sich beim Erwärmen aus, das Volumen des Dampfes ist grösser als das der Flüssigkeit und dieses wieder grösser als das des festen Körpers, ähnlich, wie in einem Koffer sehr viel Platz findet, wenn man ihn ordentlich einpackt, er aber nicht mehr zugeht, wenn der Zollbeamte an der Grenze alles durcheinander gewühlt hat. Dies muss allerdings nicht so sein, denn es gibt auch wohlgeordnete, aber dennoch ein grosses Volumen beanspruchende Kristallstrukturen, wie man eben auch einen Koffer ordentlich, aber dennoch sehr unzweckmässig einpacken kann. Dann kann bei Zerstörung dieser Ordnung das Volumen sogar kleiner werden. Diesen ziemlich seltenen Fall haben wir z. B. beim Eis, dessen Volumen bekanntlich wesentlich grösser ist als das des Wassers.

Bekanntlich gilt für die Entropie eines idealen Gases die Beziehung:

$$S - S_0 = C_v \ln T/T_0 + R \ln V/V_0$$

Dabei ist S_0 die Entropie bei der Temperatur T_0 und dem Volumen V_0 , C_v die spezifische Wärme bei konstantem Volumen und R die Gaskonstante. Auch diese Gleichung kann nach dem oben Gesagten wenigstens qualitativ gedeutet werden. Die «Unordnung», oder genauer gesagt die Entropie, wird umso grösser, je grösser das Volumen V ist, auf das die Gasmoleküle zerstreut sind. Sie ist ferner umso grösser, je höher

die Temperatur T ist, was auch verständlich ist, denn zur Temperaturerhöhung muss Wärme, also ungeordnete Energie zugeführt werden.

Aus obigen Ueberlegungen folgern wir weiterhin: Hat ein auf der Temperatur der Umgebung befindliches, jedoch mit ihr nicht im Massenaustausch stehendes System noch nicht den Zustand maximaler Unordnung erreicht, so vermag es Arbeit zu leisten. Erfolgt nämlich der Uebergang vom gegebenen Zustand in den Zustand maximaler Unordnung reversibel, so muss die Entropie der Umgebung um soviel abnehmen, als die Entropie des Systems zunimmt. Die Umgebung gibt also Wärme ab, die in Arbeit verwandelt werden kann. Hierzu ein Beispiel: In einem Zylinder befinden sich nebeneinander N_2 und O_2 , bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck zunächst durch eine Scheidewand getrennt. Dieses System ist teilweise geordnet, denn alle O_2 -Atome befinden sich links der Scheidewand, alle N_2 -Atome rechts von ihr. Tatsächlich kann ein solches System beim Uebergang in den Zustand maximaler Unordnung — d. h. der homogenen Mischung — Arbeit leisten, indem beide Gase isotherm vom Anfangsdruck auf ihren Partialdruck in der Mischung entspannt werden. (Eine solche Entspannung könnte allerdings nicht durch gewöhnliche Kolben durchgeführt werden, sondern man müsste «semipermeable Membranen» verwenden, also Wände, die jeweils nur für die Moleküle der einen Gasart durchlässig sind.) Wie bei jeder isothermen Expansion idealer Gase wird hierbei das Äquivalent der gesamten Expansionsarbeit der Umgebung entnommen.

Dieses Beispiel soll zeigen, dass der Begriff Ordnung nicht nur auf die Temperatur, wobei sozusagen die «warmen» Moleküle in den einen, die «kalten» in den anderen Behälter eingeordnet wurden, angewendet werden kann, sondern ganz allgemein auf irgend ein Ordnungsmerkmal, hier z. B. auf die verschiedenen Eigenschaften von N_2 und O_2 . In diesen Fällen nützt uns die Gleichung (1) für den Carnotprozess, in der nur von Temperaturdifferenzen die Rede ist, nichts. Dagegen ist der Begriff Entropie auch für alle diese Fälle anwendbar, wie sich später noch an manchen Beispielen zeigen wird.

Da wir hier immer von reversiblen Prozessen sprechen, ist damit auch die Umkehrung bewiesen, d. h. die Verringerung der Unordnung kann z. B. durch Schaffung eines Temperaturunterschiedes (Kühlschrank!) oder eines Konzentrationsunterschiedes (Gaszerlegung!) gegeben sein. Dabei muss die Mischung gar nicht in die reinen Komponenten zerlegt werden, auch eine Anreicherung, also eine nur teilweise Ordnung ist nur unter Arbeitsaufwand möglich.

Haben die Moleküle oder allgemeiner gesprochen, die betrachteten Teilchen eine ausgezeichnete Achse, so lässt sich die Entropie eines aus solchen Teilchen aufgebauten Körpers darstellen durch die Summe zweier Teilentropien. Die erste rührt her von der thermischen Bewegung und der nicht genau fixierten Lage der Schwerpunkte der Einzelteilchen. Sie tritt also auch bei Körpern, die aus kugelsymmetrischen Teilchen aufgebaut sind, auf und ist bei konstanter spezifischer Wärme nach Gl. (4) eine lineare Funktion des Logarithmus der absoluten Temperatur. Die andere rührt her von der nicht vollständigen Ausrichtung der Teilchen, wird also zu Null, wenn z. B. die Achsen aller Teilchen parallel sind. Eine solche Ausrichtung lässt sich in vielen Fällen durch äussere Kräfte erzwingen: Wird z. B. ein aus fadenförmigen Molekülen bestehender Körper gestreckt, so stellen sich die Molekülachsen mindestens näherungsweise in Richtung des Zuges ein. Wird ein paramagnetischer Körper magnetisiert, so richten sich die Elementarmagnete, d. h. die Elektronen aus. Beide Prozesse können weitgehend reversibel und adiabatisch durchgeführt werden. Da dann die gesamte Entropie des betreffenden Körpers erhalten bleibt, aber der Anteil, der von der Ausrichtung abhängt, abnimmt, muss der temperaturabhängige Anteil der Entropie um den gleichen Betrag zunehmen, die Temperatur des Körpers sich also erhöhen; tatsächlich beobachtet man auch beim Strecken gewisser hochelastischer Körper, wie z. B. Kautschuk oder gewisser tierischer Sehnen, wie auch beim Magnetisieren eines paramagnetischen Körpers, einen Temperaturanstieg. Gleichet man durch Wärmeabgabe die Temperatur des Körpers wieder der Umgebung an und isoliert ihn dann thermisch, so tritt bei Aufhören des äusseren Zwangszustandes, also bei Aufhören der mechanischen Zugbeanspruchung bzw. beim Ab-

schalten des Magnetfeldes, eine Temperaturerniedrigung ein. Führt man eine solche «adiabatische Entmagnetisierung» an gewissen paramagnetischen Salzen bei tiefen Temperaturen durch, so können damit sehr merkliche Temperaturerniedrigungen erzielt werden. Tatsächlich war es mit diesem von Debye und Giauque 1926 vorgeschlagenen und 1933 erstmals von Giauque verwirklichten Verfahren 1950 möglich, die bisher tiefste Temperatur von $0,0014^\circ \text{K}$ zu erreichen *).

Eine Wärmekraftmaschine, z. B. eine Dampfmaschine, wird häufig mit einem Wasserkraftwerk verglichen, wobei die Wärme, die im thermischen Kraftwerk von der Temperatur des Kessels auf die Temperatur des Kondensators «herunterfällt», ebensogut zur Arbeitsleistung herangezogen werden kann, wie eine Wassermenge, die zu Tal stürzt. In dieser Form hinkt der Vergleich, denn während beim Wasserwerk

unten im Tal gerade soviel Wasser an die «Umgebung» abgegeben wird, wie oben im Wasserschloss zufließt, ist nach dem ersten Hauptsatz die im Kondensator an die Umgebung abgegebene Wärmemenge gleich der im Kessel aufgenommenen Wärmemenge *minus* der als Arbeit gewonnenen Energie. Für den *reversiblen* Prozess gibt es jedoch nach dem eben dargelegten eine Quantität, die mit der Wassermenge in Analogie gesetzt werden kann: die Entropie. Der reversibel thermischen Maschine wird nämlich unter stationären Verhältnissen gerade soviel Entropie zugeführt, wie sie wieder an die Umgebung abgibt. Setzt man also Wassermenge = Entropiemenge = Q/T und setzt man ferner Meereshöhe h mit Temperaturhöhe in Analogie, so entspricht jede Formel für eine verlustlose hydraulische Anlage einer Formel für eine verlustlose thermische Maschine (vergl. Bild 2).

Die schweizerische Entwicklung im Bau elektrischer Lokomotiven für Adhäsionsbetrieb

Von Prof. Dr. Karl Sachs, ETH, Zürich

Die Entwicklung unserer Bahnen und jene unserer Eidgenössischen Technischen Hochschule hat sich über den gleichen Zeitraum erstreckt mit einer gewissen Parallelität und mit gewissen Wechselbeziehungen zueinander, die mit der Zusammenfassung der ursprünglich vier führenden privaten Bahngesellschaften zu den Schweizerischen Bundesbahnen als Regiebetrieb des Bundes mit Beginn des Jahres 1902 naturgemäß um so intensiver wurden. Um die gleiche Zeit — es war damals rund ein halbes Jahrhundert seit der Bahneröffnung Zürich—Baden und der Gründung der Eidgenössischen Polytechnischen Schule vergangen — begann man aber in Fachkreisen unter dem Eindruck der mit elektrischen Strassenbahnen erzielten Erfolge über die Möglichkeiten und Aussichten des elektrischen Betriebes der Vollbahnen zu diskutieren. Nachdem die ersten grosszügigen Versuche in dieser Richtung bei uns auf Grund privater Initiative durchgeführt worden waren, konnte auch unsere Staatsbahn nach ihrer in zehnjährigem Bestehen erfolgten Konsolidierung dem Gedanken des elektrischen Betriebes näherzutreten, namentlich seit im Jahre 1909 auch die Strecke der ehemaligen Gotthardbahn mit ihren grossen Steigungen und langen Tunneln, aber auch mit ihrer schon damals bedeutenden Verkehrsbelastung zu ihrem Netz hinzugekommen war. Wie dann nachher die Verhältnisse, die sich aus den beiden Weltkriegen ergaben, die Elektrifizierung des gesamten Bundesbahnnetzes erzwungen haben, wie die Privatbahnen z. T. bereits gleichzeitig dem Beispiel der Bundesbahnen folgten und wie damit die Schweiz sich zur Sonderstellung eines Landes mit praktisch ausschliesslich elektrischem Bahnbetrieb entwickelt hat, das wird immer einen der interessantesten Abschnitte unserer Verkehrs-, ja Kulturgeschichte überhaupt bilden ¹⁾.

Die Schweizerische Bauzeitung hat es sich angelegen sein lassen, über diese Entwicklung laufend zu berichten. Namentlich sind über die elektrischen Triebfahrzeuge, d. h. über die Lokomotiven und Triebwagen sowohl der Bundes- wie der Privatbahnen in den Spalten dieser Zeitschrift stets zum Teil sogar sehr ausführliche Beschreibungen erschienen, so dass der auf diesem Gebiete interessierte Leser nahezu in allen Einzelheiten als ausreichend orientiert gelten kann ²⁾. Wenn hier noch einmal von dieser Entwicklung die Rede ist, so ge-

schieht es, um gewisse Grundlinien und Gesetzmässigkeiten hervorzuheben, die sich im Ablauf dieses konstruktiven Geschehens feststellen lassen. Die Entwicklung ist sowohl durch die verschiedenen Anforderungen, die als Folge der sich ändernden Bedürfnisse an die Triebfahrzeuge gestellt werden, als auch durch die Persönlichkeit der Konstrukteure und die Art ihrer Einstellung zu diesen Anforderungen bedingt. Die bedeutende schöpferische Leistung der massgebenden Männer und ihrer Mitarbeiter berechtigt, von einer spezifisch schweizerischen Entwicklung auf dem Gebiete der elektrischen Triebfahrzeuge zu sprechen, obwohl natürlich auch hier wie auf allen Gebieten der Technik stets eine sehr intensive wechselseitige Befruchtung über alle Grenzen hinweg bestanden hat.

Was zunächst den *mechanischen Teil* der elektrischen Lokomotiven anbelangt, so umfasst die konstruktive Problematik die befriedigende Lösung der beiden Aufgaben: der Konstruktion des Laufwerks und der des Antriebs. Während bei Dampflokomotiven Laufwerk und Triebwerk konstruktiv zu einem untrennbaren Gebilde vereinigt sind, stellen sie bei elektrischen Lokomotiven immer zwei wohl miteinander verbundene, aber doch selbständige Teile dar, ein Umstand, der die Lösung der konstruktiven Probleme teils erleichtert, teils erschwert. Während das Laufwerk im allgemeinen keine Aufgaben stellt, die nicht schon vom Dampflokomotivbau her bekannt gewesen wären, ist beim Antrieb elektrischer Lokomotiven die Problematik eine doppelte bis dreifache. Denn hier muss der Antrieb zur Aufnahme der Relativbewegungen zwischen den fest im gefederten Haupt- oder Dreh-

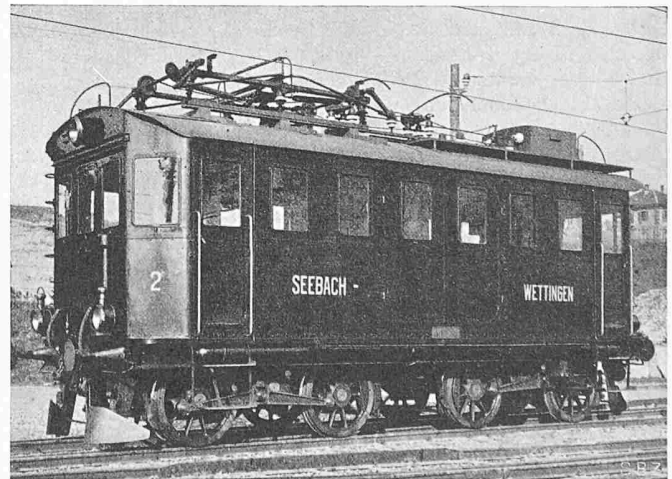


Bild 1. Die erste Einphasen-Wechselstromlokomotive gebaut 1905 für die Strecke Seebach—Wettingen von der Schweiz. Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur und der Maschinenfabrik Oerlikon

*) Nähere Angaben zum Verfahren der adiabatischen Entmagnetisierung, vgl. Van Lammeren, J. A.; Technik der Tiefen Temperaturen. Berlin 1941, J. Springer. Squire, Ch. F.; Low Temperature Physics. New York 1953, McGraw-Hill Book Company. Garrett, C. G. B.; Magnetic Cooling «Harvard Monographs in Applied Science» Nr. 4, Harvard University Press, Cambridge 1954. John Wiley and Sons, Inc. New York. P. Grassmann: «Kältetechnik» 3 (1951) S. 16/18.

¹⁾ SBZ Bd. 122, S. 149 (18. Sept. 1943); Bulletin SEV 1943, S. 587; «Ein Jahrhundert Schweizer Bahnen» Bd. I, S. 209

²⁾ Wir verweisen insbesondere auch auf die zusammenfassende Darstellung des Verfassers über die Entwicklung elektrischer Lokomotiven und Triebwagen in der Schweiz in SBZ 1947, Nr. 26. Die Red.