

14. *Bemerkungen zu einer Abhandlung
über Thermodynamik des Hrn. K. Wesendonck;
von Max Planck.*

Im vorigen Bande dieser Annalen¹⁾ macht Hr. Wesendonck gelegentlich einer Besprechung der verschiedenen Darstellungen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik einige kritische Bemerkungen²⁾ über den von mir ausgearbeiteten Beweis dieses Satzes, die ich im Interesse einer sachgemässen Beurteilung desselben nicht ohne eine kurze Erwiderung lassen kann.

Die von mir durchgeföhrte Argumentation gipfelt in dem Nachweis, dass jeder, auch mit beliebigen chemischen oder elektrischen Veränderungen verbundene Vorgang in der Natur, der zu einer Verkleinerung der Gesamtentropie aller an dem Vorgang irgendwie beteiligten Körper führen würde, stets dazu benutzt werden könnte, ein perpetuum mobile zweiter Art (d. h. eine periodisch wirkende Maschine, die Wärme ohne Compensation in Arbeit verwandelt) zu construiren. Um diesen Nachweis zu liefern, braucht man nicht auf die Einzelheiten des angenommenen Vorgangs einzugehen; es genügt vollkommen zu wissen, dass die Entropie des Körpersystems im Endzustand kleiner ist als im Anfangszustand, während ausserhalb des Systems keine Veränderungen eingetreten sind. Ferner ist es auch keineswegs nötig zu zeigen, dass jede Art der Rückkehr des Systems in den Anfangszustand die gewünschte Maschine liefern würde, sondern es genügt offenbar, wenn nur ein einziges zum Ziele führendes Verfahren namhaft gemacht werden kann. Ein solches Verfahren besteht in dem von mir eingeschlagenen Beweisgang darin, dass man durch einen ganz bestimmt beschriebenen Process mittels passender Entnahme von Wärme aus einem Wärmereservoir die Entropie des Systems wieder auf den Anfangswert vergrössert und dann durch eine

1) K. Wesendonck, Wied. Ann. 69. p. 809. 1899.

2) l. c. p. 812f.

adiabatisch-isentropische Veränderung den Anfangszustand des Systems herstellt. Dann muss nach dem ersten Hauptsatz der Wärmetheorie die der entnommenen Wärme äquivalente mechanische Arbeit gewonnen worden sein, da andere Energiearten hier nicht in Betracht kommen. Der also geschlossene Kreisprocess stellt dann ein perpetuum mobile zweiter Art vor.

Dieser Schluss erscheint mir nicht nur „plausibel“, sondern zwingend, während Hr. Wesendonck annimmt, es könnte der Fall eintreten, „dass die betreffende periodisch functionirende Maschine gar nicht Arbeit leistet“, was nach meiner Meinung dem ersten Hauptsatz der Wärmetheorie widersprechen würde.

Weiter sagt Hr. Wesendonck: „Ferner muss eine isentropische Aenderung immer als möglich vorausgesetzt werden, was doch nicht ohne weiteres angenommen werden kann.“ Dass eine isentropische Aenderung immer möglich ist, folgt nach meiner gerade in diesem Punkte sehr ausführlichen Darstellung mit Notwendigkeit aus der *Definition* der Entropie. Das ist ja gerade der Grund, weshalb ich die Entropie im directen Anschluss an die Betrachtung eines ganz bestimmten concreten, immer ausführbaren Processes definirt habe. Wo eine Veränderung nicht ausgeführt werden kann, ist eine Entropie gar nicht definirt.

Damit scheint allerdings auf den ersten Blick die Bedeutung des Entropiebegriffes eine gewisse Beschränkung zu erleiden, aber bei näherer Betrachtung wird man finden, dass diese Beschränkung gerade in der Natur der Sache liegt und eben deshalb ganz besonders in helles Licht gesetzt zu werden verdient. Es hätte nämlich offenbar gar keinen Sinn, von einem allgemeinen Maass der Irreversibilität eines Processes zu reden, wenn man nicht irgendwie in der Lage wäre, den Process zurückzuführen auf eine incompensirte Verwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme. Dementsprechend halte ich es auch für vollkommen ausreichend und durch die Oekonomie der Darstellung geradezu für geboten, der Entropie eines Körpers lediglich die Definition $dS = (dU + p dV)/T$ zu Grunde zu legen, wobei p den Druck, V das Volumen darstellt, — im Gegensatz zur Ansicht des Hrn. Wesendonck, der diese Definition zu eng findet. Die Verallgemeinerung auf anderweitige äussere Arbeit, z. B. elektrische, wobei p

eine Potentialdifferenz, V eine Elektricitätsmenge bedeutet, hedingt nach meiner Meinung durchaus nicht einen neuen physikalischen Satz, sondern nur eine neue Anwendung desselben Entropiegesetzes. Könnte man gewisse Veränderungen in der Natur etwa nur auf elektrischem oder chemischem, nicht ausserdem auch auf rein thermodynamischem Wege vermitteln, so wäre es auch nicht möglich, die mit diesen Veränderungen verbundene Entropieänderung zu messen. Auf derartige Fälle würde der zweite Hauptsatz gar keine zahlenmässige Anwendung gestatten. Inwieweit hierzu biologische Vorgänge, z. B. der Assimilationsprocess, gehören, betrachte ich als eine offene Frage, deren Beantwortung erst dann in Angriff genommen werden kann, wenn die damit verbundenen Energieumwandlungen vollständig klar gestellt sind.

Dass aber überhaupt die Bedeutung des Entropiesatzes sich auch auf andere als thermodynamische Vorgänge erstreckt, folgt einfach daraus, dass dieser Satz die *absolute* Unmöglichkeit der Realisirung des perpetuum mobile zweiter Art zur Voraussetzung hat. Genau das Gleiche gilt ja auch vom ersten Hauptsatz, dem Princip der Erhaltung der Energie. Obwohl sich dies Princip auf alle Arten von natürlichen Vorgängen bezieht, ist doch sein Inhalt vollkommen erschöpft durch den einfachen Satz, dass mechanische Arbeit auf keinerlei Weise aus nichts entstehen oder in nichts verschwinden kann, und demnach reicht auch die rein mechanische Definition der Energie zur Messung dieser Grösse in allen Fällen aus.

Schliesslich möchte ich zu den von Hrn. Wesendonck als gegensätzlich einander gegenübergestellten¹⁾ verschiedenen Formulirungen des zweiten Hauptsatzes das folgende bemerken. Der Ausspruch, dass in einem System, welches auf konstanter Temperatur und constantem Volumen gehalten wird, die freie Energie abnimmt, ist mathematisch und physikalisch genau gleichbedeutend mit dem Ausspruch, dass in einem System, welches gegen äussere Einwirkungen vollkommen abgeschlossen ist, die Entropie zunimmt. Irgend einer bestimmten äusseren Bedingung muss ein willkürlich abgegrenztes System unterworfen sein, wenn der zweite Hauptsatz einen Ausspruch über

1) l. c. p. 815.

die Richtung der in dem System eintretenden Veränderungen gestatten soll. Je nachdem man aber diese Bedingung wählt, lautet die Formulirung des Gesetzes verschieden.

Ich kann mich daher auch dem durch jene Gegensätzlichkeit veranlassten Zweifel, welchen Hr. Wesendonck bezüglich der gesunden Entwicklung der Wärmelehre äussert, nicht anschliessen.

Berlin, Januar 1900.

(Eingegangen 1. Februar 1900.)