

158 Verdampfungswärme, Verdampfungsenthalpie, Verdampfungsenthalpie

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Beschreibung des Verdampfungsvorgangs macht man gewöhnlich Aussagen über die Energie; genauer: über Wärme und Enthalpie. Wegen dieser Wahl wird die Beschreibung unanschaulich und verwirrend. Einmal ist es schwer, überhaupt zu erkennen, dass man eine Bilanz aufstellt. Außerdem hat man es mit der Atmosphäre zu tun, d.h. einem zusätzlichen System, das nur indirekt am Verdampfungsvorgang beteiligt ist.

Gegenstand

A. „Für die Phasenumwandlung flüssig \rightarrow gasförmig ist eine bestimmte (temperaturabhängige) Umwandlungswärme Q_g erforderlich.“

B. „Für das Verdampfen einer Flüssigkeit muss die Verdampfungsenthalpie aufgebracht werden. Der Umgebung bzw. der Flüssigkeit wird Wärme entzogen.“

C. „Die Wärmeenergie, die erforderlich ist, um einen Körper aus der flüssigen in die Dampfphase zu bringen, nennt man latente Verdampfungswärme. [...] Statt latente Wärme kann man auch die Bezeichnung Umwandlungsenthalpie verwenden.“

D. „Da bei der Verdampfung gegen die molekularen Anziehungskräfte Arbeit verrichtet werden muss, wird Wärme verbraucht. Die Wärmemenge, die der Masse 1 g einer Flüssigkeit zugeführt werden muss, um sie bei konstanter Temperatur zu verdampfen, bezeichnet man als *spezifische Verdampfungswärme* λ . [...] Die Verdampfungswärme besteht aus einem inneren und einem äußeren Anteil. Die äußere Wärme wird dazu verbraucht, das ursprüngliche Volumen [...] auf das Volumen von 1 g Dampf auszudehnen.“

E. „Ebenso ist Energie nötig, um die Teilchen eines Körpers beim Übergang flüssig \rightarrow gasförmig voneinander zu lösen. Ursache für den Energiebedarf beim Schmelzen und Verdampfen sind die zwischen den Teilchen der Materie existierenden anziehenden elektrischen Kräfte. Die dabei zugeführte Energie ist dann in der Materie, in dem sogenannten thermodynamischen System, als potentielle Energie der Teilchen gespeichert...“

F. „Wenn Wasser verdampft, rücken die Wassermoleküle weit auseinander. Sie müssen dabei gegen die Anziehungskräfte, die zwischen ihnen wirken, anlaufen und außerdem die Luft wegschieben. Die dazu erforderliche Energie kommt meistens von einem Heizgerät. [...] Wasserdampf hat die zusätzliche Energie gespeichert. Beim Kondensieren geht sie wieder auf andere Körper [...] über.“

Mängel

Obwohl sich die Autoren sehr unterschiedlich ausdrücken, krankt jedes der Zitate daran, dass ein Vorgang mit einer unpassenden Größe beschrieben wird, nämlich mit der Energie. Dass das zu sprachlichen und auch zu begrifflichen Unstimmigkeiten führt, zeigen die Zitate auf unterschiedliche Art.

1. Zitat A sagt: „Für die Phasenumwandlung flüssig \rightarrow gasförmig ist eine bestimmte [...] Umwandlungswärme Q_{sd} erforderlich“. Denn, so würde man gern fortfahren, das Gas enthält mehr Wärme als die Flüssigkeit. So denkt man vielleicht, aber so ist es nicht.

Man denkt so, weil die entsprechende Formulierung in einem anderen Kontext durchaus so ergänzt werden kann. „Zum Düngen eines Gartens sind zwei Sack Torf erforderlich.“ Das Torf wird zum Düngen verwendet, und befindet sich demzufolge, nachdem man es im Gartens zerstreut hat, im Garten. Wie sollte es anders sein? Im Fall der Phasenumwandlung ist es aber anders. Aus zwei Gründen:

– Die Wärme ist prinzipiell nicht irgendwo, sie ist eine Prozessgröße. Ein sprachlicher Umgang mit dieser Differenzialform, der ihren mathematischen Eigenschaften angemessen ist, und der gleichzeitig erlaubt, sich ein Bild von dem entsprechenden Vorgang zu machen, ist kaum möglich.

– Die Energie, die „in Form von Wärme“ zugeführt wird, befindet sich nach dem Zuführen nur zum Teil dort, wo man sie vermutet. Nur ein Teil befindet sich im Gas. Der andere Teil geht in ein System, das mit dem Phasenübergang kaum etwas zu tun hat: ins Gravitationsfeld.

(Wer es schon vergessen oder nie erfahren hat: Die Energie, die man zuführt, geht teilweise in den verdampfenden Stoff, denn 1 kg Wasserdampf enthält bei derselben Temperatur mehr Energie als 1 kg flüssiges Wasser. Aber nicht alle Energie endet dort. Der andere Teil wird gebraucht, „die Atmosphäre anzuheben“. Der Dampf braucht mehr Platz als das flüssige Wasser. Dieser Anteil der Energie geht also ins Gravitationsfeld.)

2. Zitat B sagt es richtig, könnte man denken, denn in der Tat bewirkt die zugeführte Energie nicht eine gleich große Zunahme der Energie des verdampfenden Stoffes. Sie ist vielmehr gleich seiner Enthalpiezunahme. Also: Richtig gemeint, aber wieder nicht sehr verständlich. Denn was heißt es, Enthalpie „aufzubringen“. Es heißt doch wohl, dass man sie sich irgendwoher beschafft. Das ist aber wieder falsch, denn man beschafft sich nicht Enthalpie, sondern Energie.

3. Der Autor von Zitat C glaubt, dem Leser dadurch helfen zu können, dass er erklärt, latente Wärme und Verdampfungsenthalpie seien nur zwei Bezeichnungen für dieselbe Sache, was nicht zutrifft. Alle Mühe, die man sich gibt, um den Studenten zu erklären, was eine Prozessgröße ist, wird durch solche Äußerungen durchkreuzt.

4. Gemäß Zitat D besteht die Verdampfungswärme aus zwei Anteilen, einem „inneren“ und einem „äußeren“. Wenn etwas aus zwei Teilen besteht, so müsste man ihm das irgendwie ansehen. Das ist aber hier nicht der Fall. Wenn man Leitungswasser einerseits zum Trinken und Kochen verwendet, und andererseits zum Spülen und Waschen, so wird man wahrscheinlich nicht sagen, das ankommende Wasser „bestehe“ aus zwei Anteilen, dem Waschwasser und dem Trinkwasser.

5. A propos „erforderlich“, Zitate A und C. Man kann es so sagen. Aber in welchen Situationen benutzt man das Wort eigentlich sonst? Schauen wir bei *Linguee* nach, wie man außerhalb der Physik mit dem Wort umgeht: „Es sind Anstrengungen erforderlich“, „alles veranlassen, was erforderlich ist“, „die Kompetenz, die für die Ausführung der Arbeiten erforderlich ist“, „die Aufbewahrung der Daten ist nicht erforderlich“, „das Bezugsrecht der Aktionäre auch insoweit auszuschließen, als es erforderlich ist“, „obwohl bedeutende Investitionen in die Energieinfrastruktur erforderlich sind“, „nach der Satzung oder nach der Geschäftsordnung für den Vorstand Entscheidungen des Aufsichtsrats erforderlich waren“.

Und nehmen wir uns auch gleich noch das „aufbringen“ aus Zitat B vor. Wie ist der übliche Gebrauch des Verbs? Wieder ein Blick in *Linguee*: „Investitionssummen aufbringen“, „Flexibilität aufbringen“, „Vorschuss aufbringen“, „Mut aufbringen“.

In beiden Fällen, dem „Erforderlichsein“ und dem „Aufbringen“, wird nahe gelegt, dass es um die Vorbereitung eines Vorgangs geht, und nicht um das Zuführen von etwas, das Mengencharakter hat. Man wird nicht ermutigt zu fragen: Wo kommt es her? Wo geht es lang? Wo geht es hin?

Ich kann mir vorstellen, dass derjenige, der im Umgang mit diesen Konzepten geübt ist, die vorangehenden Bemerkungen für pedantisch hält. Als Lehrer weiß ich aber noch zu gut, dass begriffliche Ungenauigkeit eine der Hauptursachen von Lernschwierigkeiten ist.

6. Schulbuchautoren, wissen, dass man Aussagen, wie wir sie gerade angesprochen haben, Schülern nicht zumuten kann. Und zwar nicht deshalb, weil die Schüler zu dumm sind. Daher begibt man sich in Schulbüchern auf sichereres Terrain, Zitate E und F: Keine Aussagen über die „Prozessgrößen“ Wärme und Arbeit, keine Aussage über die *Legende-Transformierte* „Enthalpie“, sondern nur über die gutmütige, lokal bilanzierbare Zustandsgröße Energie. So kann man auf jeden Fall eine den Schülern verständliche Sprache benutzen. Trotzdem ist man das Problem nicht los. Dass ein Teil der Energie in das Gravitationsfeld geht, wird manchmal einfach übergangen, Zitat E. Man kann allerdings Verständnis hierfür aufbringen, denn das ist schließlich nur ein unerwünschter Nebeneffekt. Korrekt ist es aber nicht. In Zitat F wird dieser Effekt angesprochen. Nach unserer Meinung wäre das also der bestmögliche Umgang mit dem Thema. Trotzdem läuft auch hier etwas nicht rund. Ich möchte versuchen, es mit Hilfe eines Gleichnisses zu erläutern.

Man möchte vergleichen, wieviel Stahl zum Bau verschiedener Hängebrücken verwendet wurde. Die Brücken haben alle dieselbe Länge, Tragfähigkeit etc., sind aber verschieden gebaut. Man nimmt als Maß für die gesuchte Eigenschaft das Geld, das der Bau der Brücke gekostet hat. In der Tat dient (so nehmen wir hier an) der größte Teil des finanziellen Aufwandes dem Ankauf des Stahls. Nun wird aber ein Teil der finanziellen Aufwendungen noch für andere Zwecke gebraucht, vor allem für die Bezahlung der Baufirmen. Man hat also zur Bewertung dessen, worum es eigentlich ging, das falsche Maß genommen: den Geldwert des Brückenbaus, statt der eigentlich interessierenden Größe, nämlich der Menge des Stahls. Ähnlich ist es bei der quantitativen Beschreibung des Verdampfungsvorgangs. In Ermangelung eines besseren Maßes (nämlich der Entropie) benutzt man eine Ersatzgröße, die Energie, die aber nur teilweise das charakterisiert, was einen eigentlich interessiert.

Herkunft

1. Man geht mit der Energie um, wie Ende des 19. Jahrhunderts. Die folgende Entwicklung wird ignoriert. Erst seit der Wende zum 20. Jahrhundert konnte man die Energie lokal bilanzieren, siehe etwa [1].

2. Man bilanziert die unpassende Größe. Mit der Entropie wird alles einfacher. Dass auch sie lokal bilanziert werden kann, wurde 1911 gezeigt [2], ist aber in den meisten Hochschulbüchern noch nicht angekommen.

Entsorgung

Wenn man das Verdampfen, etwa von Wasser, mit Hilfe der Energie beschreiben will:

Man führt die Portion Wasser, die verdampfen soll, Energie zu. Diese steckt nachher teilweise im Dampf, teilweise als so genannte potentielle Energie in der Atmosphäre, die der Dampf verdrängen oder anheben muss. (Noch besser ist es, das Gravitationsfeld als Energiespeicher zu bezeichnen.) Man kann die gesamte Energie allein durch Variablen des Systems „verdampfendes Wasser“ ausdrücken: $E + pV$. Man kann also auch sagen man führt einer Wasserportion die Energie ΔE zu. Die Änderung ΔH ihrer Enthalpie ist gleich der zugeführten Energie ΔE . Die restliche Energie wurde weitergegeben.

Einfacher und klarer wird die Beschreibung, wenn man statt der Energie die Entropie bilanziert. Die Entropie verhält sich genau so, wie es uns der gesunde Menschenverstand sagt: Man führt dem flüssigen Wasser Entropie zu, dadurch verdampft es. Die zugeführte Entropie steckt in dem neu entstandenen Wasserdampf. Die Verdampfungsentropie lässt sich genau so leicht messen wie die Verdampfungswärme [3].

[1] G. Mie: [Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung](#), Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CVII. Band VIII. Heft (1898), S. 1113

[2] F. Jaumann: [Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze](#), Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, S. 385-530.

[3] F. Herrmann: Altlasten der Physik, Teil 1, Artikel 16: [Die Messung der Entropie](#)