

552 Streitgespräch zwischen zwei Physikern

... aus dem Fachdidaktik-Seminar der Uni Stgt vor einigen Jahren ... ☺

Angela: Die betrachtete Gasmenge hat vor und eine Weil nach dem Zusammenpressen exakt die gleiche Energie. Woher kommt dann aber die Energie, die man einer gefüllten Pressluftflasche zuschreibt ... man kann mit ihr z.B. einen kleinen Presslufthammer betreiben...

Jan: Ich habe das Problem mit der Pressluftflasche nicht verstanden. Wenn ich eine Gasmenge verdichte, brauche ich dafür mechanische Energie. Diese Energie geht in Bewegungsenergie der Teilchen (die Flasche wird warm) und innere Energie (das Gas wird doch verflüssigt) über. Wenn die Flasche abgekühlt ist, ist die Bewegungsenergie der Teilchen wieder wie am Anfang. Aber die innere Energie ist noch da. Und wo war der Widerspruch???

Angela: Bei der Füllung einer Taucher-Pressluftflasche wird die Luft nicht verflüssigt – es erfolgt kein Phasenübergang. Die Luft ist in der Pressluftflasche gasförmig – nur unter einem hohen Druck...

Jan: Durch die Kompression ohne Verflüssigung hat man doch zumindest die Entropie des Gases **erhöht**, und die geht ja wohl nicht verloren, oder? Und da in Entropie Energie "steckt", kann man einen Presslufthammer betreiben.

Angela: Durch das Zusammenpressen wird die Entropie des Gases **verringert** ... das ist ein Vorgang, der nicht von alleine abläuft ... dazu ist Energie notwendig. Die Pressluftflasche wird bei diesem Vorgang erwärmt, die Temperatur in der Pressluftflasche ist höher als in der Umgebung, die Temperaturdifferenz - als Antrieb für einen Entropiestrom - sorgt dafür, dass Entropie aus dem komprimierten Gas nach außen fließt - und dabei übrigens Energie mitnimmt – entsprechend der Formel $\Delta E = \Delta S \cdot T$.

In der abgekühlten, gefüllten Pressluftflasche ist also weniger Entropie enthalten, als in der nicht komprimierten Gasmenge zuvor. Die Energiebilanz ist aber nach dem Abkühlen ausgeglichen.

Wenn man die Flasche nun öffnet, dann wächst die Entropie bei der Expansion des Gases an.

Bei der Expansion sinkt die Temperatur des Gases, die Temperaturdifferenz sorgt nun dafür, dass Entropie in die Gasmenge hineinfließt ... und dabei Energie mitnimmt...

Pressluftflasche in Schritte

Zustand 1 - leere Pressluftflasche - Luftvolumen noch außerhalb

- [01] Pressluftflasche ist leer
Die Luftmenge m_1 , die nachher in der Pressluftflasche ist, befindet sich im Moment noch bei dem Volumen V_1 , der Temperatur T_1 (Umgebungstemperatur) und Umgebungsdruck p_1 ($\approx 1\text{bar}$) und der Entropie S_1 außerhalb der Pressluftflasche. Wir ziehen eine gedankliche! Systemgrenze um diese Luftmenge.
- [02] Diese Luftmenge enthält die Energie E_1

Prozess: Komprimierung

- [03] Der Kompressor presst diese Luftmenge unter Energieaufwand ΔE in die Pressluftflasche – nun ist die Luftmenge in der Pressluftflasche.

Zustand 2 - gefüllt, heiße Pressluftflasche

- [04] Die Luftmenge steht nun nach der Befüllung in der Pressluftflasche bei einem Volumen V_2 ($V_2 < V_1$) unter einem Druck p_2 ($p_2 > p_1$) bei einer Temperatur T_2 ($T_2 > T_1$)
- [05] Die Energie ΔE , die der Kompressor aufgebracht hat, steckt direkt nach der Befüllung (unter der Annahme eines thermisch isolierten Systems ... z.B. wenn dieser Vorgang so schnell geht, dass keine thermische Energie in die Umgebung entweicht) in der Pressluftflasche – $E_2 = E_1 + \Delta E$
Das bedeutet aber zwangsweise, dass die Bewegungsenergie der Gasteilchen in der Pressluftflasche größer sein muss als vorher ... das passt dazu, dass T_2 größer ist als T_1 .
- [06] Die allgemeine Gasgleichung $p \cdot V/T = \text{konstant}$ ist bei diesem Vorgang erfüllt.
- [07] Die Entropie S bleibt bei diesem mechanischen Befüllvorgang konstant ($S_1 = S_2$). Sie kann bei einem „thermisch isolierten System“ nicht abnehmen ... und weil es sich bei der Kompression um einen mechanischen Energiebeitrag ΔE handelt, nimmt die Entropie auch nicht zu (von Reibungsvorgängen bei der Befüllung wollen wir auch absehen! – idealer mechanischer Vorgang – früher nannte man diesen Vorgang: mechanische Arbeit).
- [08] Wenn die Gasmenge aber in einem kleineren Volumen steckt, dann ist die zugehörige Energie im „Ortsraum“ kleiner – ABER im „Impulsraum“ (Geschwindigkeitsraum) wächst die Entropie an – deshalb ist die komprimierte Gasmenge ja auch auf einer höheren Temperatur als vorher.

Prozess: Abkühlung bis zum thermodynamischen Gleichgewicht

- [09] Nun stellt man die „heiße Pressluftflasche“ in einen Lagerraum und wartet ab, bis sich die Pressluftflasche in einem thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung befindet. Bei diesem Abkühlvorgang fließt thermische Energie (früher Wärme ΔQ) zusammen mit Entropie ΔS aus der Pressluftflasche in die Umgebung ... so lange, bis die Temperatur T_3 auf die Temperatur T_1 (Umgebungstemperatur) abgesunken ist.

Zustand 3 - gefüllt, abgekühlte Pressluftflasche

- [10] Nach dieser Zeit (wenn sich die Pressluftflasche im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung befindet) enthält die Pressluftflasche also weniger Entropie als vorher – also $S_3 < S_2 (=S_1)$.
- [11] Und die Energie in der Pressluftflasche E_3 ist wieder auf den Wert E_1 abgesunken. Die Energie ΔE , die durch den Kompressor an mechanischer Energie in die Pressluftflasche gekommen ist, fließt mit der Entropie $\Delta S = \Delta E/T$ in die Umgebung ab.
- [12] Wir haben also eine Pressluftflasche mit $V_3 = V_2$; $T_3 = T_1$; $p_3 = p_2$; $E_3 = E_1$; $S_3 = S_1 - (\Delta E / T)$

Prozess: Pressluftflasche treibt einen Presslufthammer an ...

- [13] Es wird mechanische Energie ΔE^* an den Presslufthammer geliefert.
- [14] Diese mechanische Energie ΔE^* kommt aus der Pressluftflasche – sie fehlt in der Pressluftflasche – also sinkt die Temperatur in der Pressluftflasche ab.
- [15] Das Gasvolumen nimmt bei diesem Vorgang zu – es strömt ja aus der Pressluftflasche. Das heißt, die Entropie im Ortsraum nimmt zu ... diese Zunahme der Entropie im Ortsraum passt zur Abnahme der Entropie im Impulsraum (denn die Temperatur sinkt).
- [16] Wenn zwischen der Umgebung und der Pressluftflasche aber eine Temperaturdifferenz besteht, dann fließt thermische Energie – zusammen mit Entropie – aus der Umgebung in die Pressluftflasche ...
- [17] Wenn der Vorgang nicht zu schnell erfolgt, dann könnte man sagen, dass der Presslufthammer mit einer Energie betrieben wird, die aus der Umgebung kommt ... ☺