

1. Was ist Dampf? – Die physikalischen Grundlagen

Wir alle wissen was geschieht, wenn in der Küche im Teekessel das Wasser zu kochen beginnt: Dampf tritt aus der Tülle und wenn der Deckel nicht fest sitzt, springt er auf und ab.

Was hat sich im Kessel zwischen dem Einfüllen des kalten Wassers und dem Entweichen des Dampfes aus der Tülle abgespielt?



Im gleichen Augenblick, in dem der Kessel mit dem kalten Wasser auf das Feuer oder den Brenner gebracht wurde, hat die Wärme begonnen, sich einen Weg durch das Metall des Kessels in das Wasser hinein zu verschaffen. Die ständige Wärmezufuhr hat das Wasser immer wärmer werden lassen, bis es schließlich zu kochen begann.

Sobald das Kochen einsetzte, hatte das Wasser einen Zustand erreicht, in dem es weitere Wärme nicht mehr ohne Veränderungen aufnehmen konnte. Da der Kessel sich jedoch noch auf dem Feuer bzw. auf dem Brenner befand, gelangte auch weiterhin Wärme an das Wasser. Was geschah?

Eine Änderung bahnte sich im Wasser an: Die überschüssige Wärme, die sich Zutritt zum Wasser verschaffte, verwandelte einen Teil des Wassers in Wasserdampf. Der entweichende Wasserdampf führte die überschüssige Wärme ab. Solcher Wasserdampf ist gemeint, wenn im Folgenden wie in der Praxis kurz von „Dampf“ gesprochen wird.

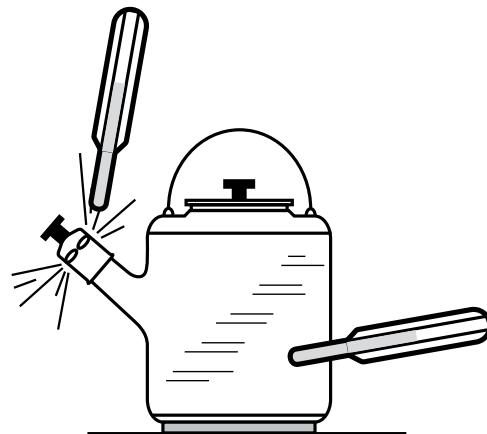
Ließen wir den Kessel auf dem Feuer stehen, so würde immer mehr Wasser durch die einströmende Wärme verdampft werden, bis schließlich das gesamte Wasser in Dampf verwandelt wäre. (Anschließend brennt der Topf durch!)

1.1 Warum verwenden wir Dampf?

Warum verwenden wir Dampf zum Kochen von Marmelade, zum Sterilisieren von Operationsbesteck, zum Vulkanisieren von Autoreifen, zum Erwärmen von Waschwasser in Wäschereien, zum Kochen von Konserven, bei der Erzeugung von Benzin aus Rohöl, zum Antrieb von Turbinen und Pumpen, zur Bewerkstelligung unzähliger Vorgänge in allen Zweigen der Industrie? Warum gerade Dampf? Warum ist die Verwendung von Dampf in der zivilisierten Welt zu einem Gemeingut geworden?

Der Grund hierfür ist, dass ein allgemeiner Bedarf an Wärmeenergie besteht und dass der Dampf ein besonders geeignetes wirtschaftliches Mittel zur Übertragung größerer Energiemengen von einer Stelle zu einer anderen darstellt. Dampf lässt sich leicht herstellen, dies zudem noch aus Wasser, das auf der Erde reichlich verfügbar ist. Dampf ist bequem zu handhaben und ist ein wirklich vielseitiges Hilfsmittel.

Zur Durchführung eines einfachen Versuchs über die im Dampf enthaltene Energie wollen wir uns wieder dem Teekessel zuwenden. Zunächst soll der Dampf auf seine Temperatur untersucht werden. Wenn wir ein Thermometer in das kochende Wasser und ein anderes Thermometer in den Dampf an der Mündung der Tülle stecken, stellen wir fest, dass beide Thermometer gleich viel anzeigen, d.h. der Dampf ist ebenso heiß wie das kochende Wasser (etwa 100 °C).



Und nun prüfen wir den Dampf auf sein Arbeitsvermögen: Wir stellen fest, dass der Kesseldeckel sich auf und ab bewegt. Das Arbeitsvermögen, die mechanische Energie des Dampfes ist die Ursache für diese Bewegungen des Deckels.

Wird in einer Kesselanlage Dampf erzeugt, so treten praktisch die gleichen Vorgänge auf wie beim Teekessel. Der Dampfkessel ist der große, wunderbare Bruder des Teekessels. Der wichtigste Unterschied zwischen den beiden besteht darin, dass der Teekessel eine Tülle hat – und das soll nicht nur eine humorvolle Feststellung sein, wie wir bald merken werden.

1.2 Die wichtigsten Maßeinheiten des „SI-Systems“

Zunächst wollen wir Sie mit dem seit 1.1.1978 verbindlich gültigen Maßsystem, dem „SI-System“, und mit einigen Fachausdrücken vertraut machen. Dies ist nicht nur zum allgemeinen Verständnis notwendig, sondern auch zur Verständigung mit Ihren Gesprächspartnern beim Bau, Umbau

1 – Was ist Dampf?

oder bei der Instandsetzung Ihrer Anlage. Wir werden in den folgenden Ausführungen nur noch mit den Maßeinheiten des SI-Systems arbeiten und die des alten „verbotenen“ technischen Maßsystems nicht mehr verwenden. Umrechnungen neues/altes Maßsystem geben wir nur in der folgenden kurzen Erklärung.

Basisgröße	Basiseinheit	
	Name	Einheitenzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Die in unserem technischen Fachbereich wichtigsten Größen sind Kraft, Druck, Energie und Wärme, Leistung und Wärmestrom sowie Temperatur.

1.2.1 Die Kraft

Der Zusammenhang zwischen Masse und Kraft ergibt sich aus dem Newton'schen Grundgesetz (Fallgesetz):

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung} \quad F = m \cdot a$$

Die Kraft ergibt sich im SI-System als abgeleitete Größe:

$1 \text{ kgm/s}^2 = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$, wobei die abgeleitete Einheit kgm/s^2 den besonderen Namen „Newton“ (Einheitenzeichen N, sprich „njuten“) erhielt. $1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$.

Durch $1 \text{ kp} = 1 \text{ kg} \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2 = 9,80665 \text{ kgm/s}^2$ ergibt sich der Zusammenhang zwischen Newton und dem alten Kilopond zu $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$ und $1 \text{ N} = 0,10197 \text{ kp}$.

Für die meisten technischen Anwendungen ist die Umrechnung schon genau genug wenn man schreibt:

$$1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N} \text{ bzw. } 1 \text{ N} = 0,102 \text{ kp}$$

Nimmt man einen Fehler von 2% in Kauf, dann gilt sogar $1 \text{ kp} \approx 10 \text{ N}$.

1.2.2 Der Druck

Für den Druck gilt die Beziehung:

$$\text{Druck} = \text{Kraft durch Fläche} \quad p = F/A$$

In der Thermodynamik ist für den Druck früher die Einheit $1 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ at}$ des technischen Maßsystems vorherrschend gewesen.

Die abgeleitete SI-Einheit für den Druck ist N/m^2 , die den besonderen Namen „Pascal“ (Einheitenzeichen Pa) erhielt.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Durch die Beziehung $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$ ergibt sich die Umrechnung des technischen Maßsystems in die SI-Einheiten für den Druck zu $1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2 = 98066,5 \text{ N/m}^2 = 98066,5 \text{ Pa}$ bzw. $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 0,102 \cdot 10^{-1/2} \text{ kp/cm}^2 = 0,102 \cdot 10^{-4} \text{ at}$.

Um diese für die Thermodynamik relativ großen Zahlenwerte zu vermeiden, wurde für die abgeleitete SI-Einheit 10^5 N/m^2 der besondere Name „Bar“ (Einheitenzeichen bar) eingeführt, $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}$.

Diese Einheit hat den Vorzug, dass sie zahlenmäßig etwa mit der bisher verwendeten Einheit Atmosphäre (at) übereinstimmt.

Durch die Umrechnung von $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$ ergibt sich $1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2 = 98066,5 \text{ N/m}^2 = 0,980665 \text{ bar}$ bzw. $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 1,02 \text{ kp/cm}^2 = 1,02 \text{ at}$.

Nimmt man 2% Fehler in Kauf, dann gilt sogar $1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2 \approx 1 \text{ bar}$.

Häufig wird der Druck als Druckdifferenz zum herrschenden Umgebungsluftdruck, dem Bezugsdruck, angegeben, weil nur dieser Differenzdruck mit dem Manometer unmittelbar gemessen werden kann. Dieser Differenzdruck wird angegeben als Überdruck p_e oder als Unterdruck p_u zum Bezugsdruck.

Zur Vermeidung von Verwechslungen ist dann zu schreiben:

Absoluter Druck	= 1 bar	oder $p_{\text{abs}} = 1 \text{ bar}$,
Überdruck	= 1 bar	oder $p_e = 1 \text{ bar}$,
Unterdruck	= 0,2 bar	oder $p_u = 0,2 \text{ bar}$,
Druckdifferenz	= 1 bar	oder $\Delta p = 1 \text{ bar}$

1.2.3 Energie, Arbeit, Wärmemenge

Für die Arbeit gilt die Beziehung:

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Weg} \quad W = F \cdot s$$

Im technischen Maßsystem war die Einheit kpm gebräuchlich:

$$1 \text{ kpm} = 1 \text{ kp} \cdot 1 \text{ m}$$

Die abgeleitete SI-Einheit für die Energie, Arbeit und Wärmemenge ist Nm, die den besonderen Namen „Joule“ (Einheitenzeichen J, sprich „dschul“) erhielt.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$$

Durch die Umrechnung von $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$ ergibt sich:

$$1 \text{ kpm} = 9,80665 \text{ Nm} = 9,80665 \text{ J} \text{ bzw.}$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 0,102 \text{ kpm}$$

Nimmt man 2% Fehler in Kauf, dann gilt sogar:

$$1 \text{ kpm} \approx 10 \text{ Nm} = 10 \text{ J}$$

Das mechanische Wärmeäquivalent besagt, dass die Wärmemenge von 1 kcal ungefähr der Energie oder mechanischen Arbeit von 427 kpm entspricht. $1 \text{ kcal} \approx 427 \text{ kpm}$.

Die Verwendung des mechanischen Wärmeäquivalents ist im SI-System überflüssig, da Arbeit, Energie und Wärmemenge in der gleichen Einheit (J) gemessen werden.

Durch entsprechende Umrechnung ergibt sich mit hinreichender Genauigkeit:

$$1 \text{ kcal} \approx 427 \text{ kpm} \approx 4200 \text{ J} = 4,2 \text{ kJ} \text{ bzw.}$$

$$1 \text{ J} \approx 0,102 \text{ kpm} \approx 2,39 \cdot 10^{-4} \text{ kcal}, 1 \text{ kJ} \approx 0,239 \text{ kcal} \text{ und weiter:}$$

$$1 \text{ kcal} \approx 4200 \text{ Ws} = 11,6 \cdot 10^{-4} \text{ kWh} \text{ bzw.}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MWs} \approx 860 \text{ kcal.}$$

1.2.4 Leistung, Energiestrom, Wärmestrom

Für die Leistung gilt die Beziehung:

$$\text{Leistung} = \text{Arbeit je Zeiteinheit} \quad P = W/t$$

Im technischen Maßsystem war die Einheit kpm/s gebräuchlich, weiterhin die Pferdestärke (PS)

$$1 \text{ kpm/s} = 1 \text{ kpm} / 1 \text{ s} \quad 1 \text{ PS} = 75 \text{ kpm/s}$$

Die abgeleitete SI-Einheit für die Leistung, den Energiestrom und den Wärmestrom ist J/s mit dem besonderen Namen „Watt“ (Einheitenzeichen W). $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ Nm/s}$.

Durch die Umrechnung von $1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$ und durch das mechanische Wärmeäquivalent ergibt sich mit hinreichender Genauigkeit:

$$1 \text{ kcal/h} \approx 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ PS} \approx 1,16 \text{ W}$$

$$1 \text{ W} \approx 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ PS} \approx 0,860 \text{ kcal/h}$$

$$1 \text{ PS} \approx 632 \text{ kcal/h} \approx 736 \text{ W}$$

$$1 \text{ PS} \approx 0,736 \text{ kW}$$

1.2.5 Dichte und spezifisches Gewicht

$$\text{Dichte} = \text{Masse durch Volumen} \quad \rho = m/V$$

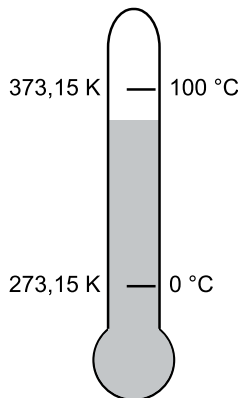
Das spezifische Gewicht (auch Wichte genannt) ist definiert als

$$\text{spez. Gewicht} = \text{Gewicht durch Volumen} \quad \gamma = G/V$$

Früher wurde bei Verwendung des technischen Maßsystems das spezifische Gewicht γ bevorzugt und in kp/m^3 angegeben. Diese Bezeichnung darf nicht mehr verwendet werden. Es ist hierfür die im SI gebräuchliche Dichte zu verwenden, welche in der Einheit kg/m^3 angegeben wird. Durch die Beziehung $1 \text{ kp} = 1 \text{ kg} \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2$ stimmt der Zahlenwert für die Dichte ρ eines Stoffes überein mit dem Zahlenwert für die mit der Normalfallbeschleunigung $\gamma = 9,80665 \text{ m/s}^2$ bestimmte Wichte γ dieses Stoffes.

Die Dichte $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$ entspricht der Wichte $1000 \text{ kp/m}^3 = 1 \text{ kp/dm}^3 = 1 \text{ p/cm}^3$.

1.2.6 Temperatur



Die thermodynamische Temperatur (T, ϑ) ist die Basisgröße des SI mit der Basiseinheit Kelvin (Einheitenzeichen K).

Der Zahlenwert für die Temperaturdifferenz in Grad Celsius ist identisch mit dem Zahlenwert der Temperaturdifferenz in Kelvin.

Die Einheit Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ist keine Basiseinheit des SI-Systems, darf aber weiter angewendet werden.

Die Celsius-Temperatur steht zur thermodynamischen Temperatur in folgender Beziehung: $t = T - T_n$ ($T_n = 273,15 \text{ K}$). Hierbei ist T_n die Normtemperatur bezogen auf den absoluten Nullpunkt der Thermodynamik (0 K). Er liegt auf der Celsius-Skala bei $-273,15^{\circ}\text{C}$.

Es gilt also:

$$0 \text{ K} = -273,15^{\circ}\text{C} \text{ bzw. } 0^{\circ}\text{C} = 273,15 \text{ K}$$

Beispiel für $T = 373,15 \text{ K}$:

$$t = 373,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = +100^{\circ}\text{C}.$$

1.2.7 Temperaturdifferenzen

Früher wurden Temperaturdifferenzen in der Einheit Grad (Einheitenzeichen grd) angegeben. Dieses ist nicht mehr zulässig. Temperaturdifferenzen müssen in Kelvin (K) ausgedrückt werden, z. B.:

$$T_1 - T_2 = \Delta T = 500 \text{ K} - 450 \text{ K} = 50 \text{ K}$$

$$t_1 - t_2 = \Delta t = 100^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C} = 50 \text{ K}$$

1.2.8 Der Normzustand; das Normvolumen

Der Normzustand ist nach DIN 1343 ein durch Normtemperatur und Normdruck festgelegter Zustand eines festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffes.

Er ist definiert durch die Normtemperatur $T_n = 273,15 \text{ K}$ bzw. $t_n = 0^{\circ}\text{C}$ und den Normdruck $p_n = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$ (früher 1 atm).

Dieser aus der bisherigen physikalischen Atmosphäre (atm) hergeleitete Normzustand ist zu unterscheiden vom „technischen“ Normzustand, welcher sich aus der bisherigen technischen Atmosphäre (at) herleitet.

Der technische Normzustand ist definiert durch die Normtemperatur $T_n = 293,15 \text{ K}$ bzw. $t_n = +20^{\circ}\text{C}$ und den Normdruck $p_n = 98066,5 \text{ Pa} = 0,980665 \text{ bar}$ (früher 1 at).

Der aus der früheren physikalischen Atmosphäre hergeleitete Normzustand ist maßgeblich für die Definition des Normvolumens. Das Normvolumen V_n ist nach DIN 1343 das Volumen im Normzustand bei $T_n = 273,15 \text{ K}$ bzw. $t_n = 0^{\circ}\text{C}$ und $p_n = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$ (früher 1 atm). Das stoffmengenbezogene (molare) Normvolumen des idealen