

Thermodynamik für Ingenieure

Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium

Bearbeitet von
Klaus Langeheinecke, André Kaufmann, Kay Langeheinecke, Gerd Thieleke

10., überarbeitete Auflage 2017. Taschenbuch. XX, 542 S. Softcover
ISBN 978 3 658 14300 8
Format (B x L): 16,8 x 24 cm
Gewicht: 1113 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Technik Allgemein > Physik, Chemie für Ingenieure](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

2.1 Systeme und Energien

Ein Gegenstand oder ein Bereich wird zur Untersuchung abgegrenzt und als System bezeichnet. Systeme werden durch Übertragen von Energie beeinflusst.

Die Thermodynamik baut auf Beobachtung auf. Die Gegenstände oder Bereiche der Beobachtung werden als *thermodynamische Systeme* bezeichnet.

Für eine genaue Beobachtung ist es notwendig, ein System¹ von seiner Umgebung durch eine Grenze zu trennen.

Bei einem Motor kommt es beispielsweise darauf an, ob er mit oder ohne Lichtmaschine, mit oder ohne Getriebe untersucht werden soll. Entsprechend ist die Grenze zwischen dem System und seiner Umgebung zu ziehen (Abb. 2.1). Die allgemeine Form dieser Aussage zeigt Abb. 2.2.

Thermodynamische Prozesse lassen sich dann als eine wechselseitige Beeinflussung von System und Umgebung oder von zwei Systemen untereinander auffassen (Abb. 2.3).

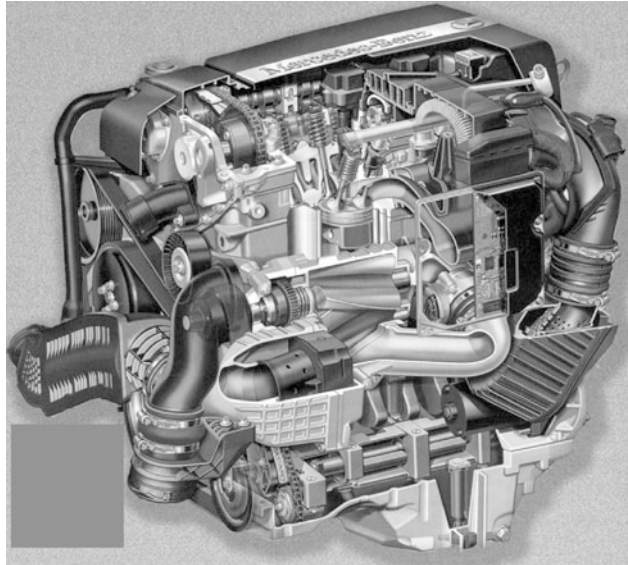
Energieübertragung Die Beeinflussung von Systemen geschieht durch Übertragen von Energie. Jede Energieübertragung bewirkt Änderungen des Zustandes im System, also beispielsweise Änderungen von Druck und Temperatur.

Energie kann entweder auf mechanischem oder auf thermischem Weg oder auch gebunden an einen Stoffstrom übertragen werden (Abb. 2.4).

Bei mechanischer Energieübertragung wirkt eine Kraft auf die Systemgrenze und verrichtet *Arbeit*.

¹ Als *System* bezeichnet man eine Gesamtheit von Teilen, die zueinander, zum Ganzen und in der Regel auch zur Umwelt in irgendeiner Beziehung stehen, aufeinander wirken und sich gegenseitig beeinflussen. Dagegen bilden die Elemente einer Menge nur ein bloßes Beieinander. [Nach [49]]

Abb. 2.1 Ein Motor als Gegenstand einer thermodynamischen Untersuchung
Die Systemgrenze kann Lichtmaschine und Getriebe einschließen oder ausschließen. [Aus Lexikon Motortechnik, Vieweg 2004]



Wenn System und Umgebung verschiedene Temperaturen haben, wird *Wärme* übertragen, also auf thermischem Weg Energie in das System oder aus dem System transportiert.

Ein Stoffstrom, der über eine Systemgrenze tritt, hat zumindest kinetische Energie. Auch weitere Energiearten werden auf diese Weise übertragen, so dass man die *stoffstromgebundenen Energien* als dritte Art der Energieübertragung nennen muss.

Systemarten Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, mehrere Arten von Systemen zu unterscheiden. In technischen Anlagen hat man es meistens mit Systemen zu tun, über deren Grenzen Energieströme und Stoffströme fließen. Solche Systeme nennt man offene Systeme.

Abb. 2.5 zeigt als Beispiel eines offenen Systems eine von einem Stoffstrom durchflossene Rohrleitung. In die Rohrleitung ist eine Maschine mit einer Welle eingebaut, mit der Energie in Form von Arbeit in das System hinein oder aus dem System hinaus transportiert werden kann. Am Ende wird die Rohrleitung zu einem Wärmeaustauscher, in dem der Stoffstrom wie in Abb. 2.5 von einem Gasbrenner erwärmt oder mit kaltem Wasser abgekühlt werden kann.

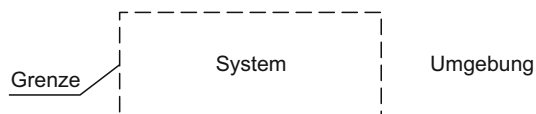


Abb. 2.2 System, Grenze, Umgebung

Die Systemgrenzen werden durch *gestrichelte* (wie hier) oder durch *strichpunktierte* oder *punktierte Linien* gekennzeichnet.

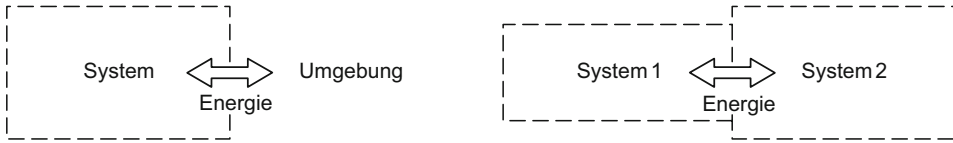


Abb. 2.3 Beeinflussung von Systemen durch Energieübertragung

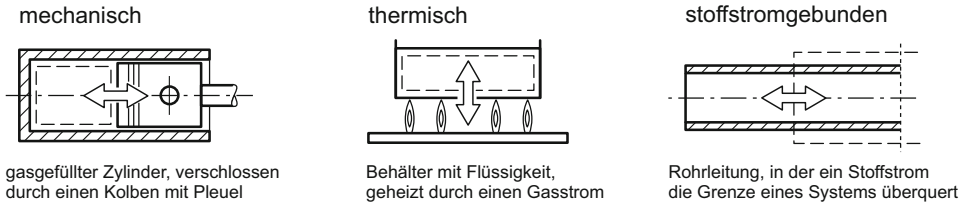


Abb. 2.4 Arten der Energieübertragung (Kennzeichen \Leftrightarrow)

Abb. 2.5 Offenes System
Stoffübertragung sowie mechanische, thermische und stoffstromgebundene Energieübertragung sind möglich.

- \dot{m} Stoffstrom
- P Leistung
- \dot{Q} Wärmestrom

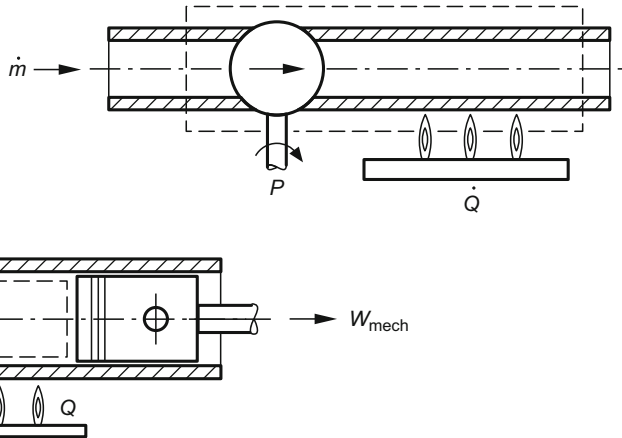


Abb. 2.6 Geschlossenes System

Mechanische und thermische Energieübertragung sind möglich, jedoch keine Stoffübertragung.

- Q Wärme
- W_{mech} Mechanische Arbeit

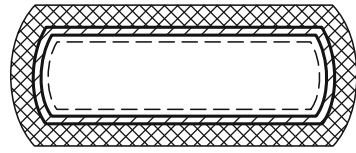
Systeme, über deren Grenzen nur Energieströme, aber keine Stoffströme fließen, kommen in der Technik weniger vor, werden aber viel für grundsätzliche Überlegungen benutzt. Diese Systeme heißen *geschlossene Systeme* (Abb. 2.6).

Die Skizze zeigt als Beispiel eines geschlossenen Systems die Gasfüllung eines ventillosen Zylinders, der durch einen Pleuel verschlossen ist und durch einen Gasbrenner erwärmt werden kann; Arbeit lässt sich über die Pleuelstange übertragen.

Ist bei einem System weder Energieübertragung noch Stoffübertragung möglich, nennt man es ein *abgeschlossenes System* (Abb. 2.7).

Abb. 2.7 Abgeschlossenes System

Es ist keine Energieübertragung und keine Stoffübertragung möglich.



Die Skizze zeigt als Beispiel eines abgeschlossenen Systems die Füllung eines starren, wärmeisolierten Behälters. Die Kreuzschraffur kennzeichnet die zur Wärmedämmung aufgebrauchte Isolierung.

Adiabate, rigide und diatherme Systeme Wenn über die Grenze eines Systems keine Wärme übertragen werden kann, nennt man das System *adiabat*. Offene und geschlossene Systeme können durch eine entsprechende Wärmeisolierung genügend genau adiabatisch gemacht werden (Abb. 2.8). Natürlich findet auch dann keine Wärmeübertragung statt, wenn die Temperatur auf beiden Seiten der Grenze gleich ist. Dies trifft beispielsweise auf alle Rohrleitungsquerschnitte zu, die daher immer als adiabatisch anzusehen sind.

Wenn über die Grenze eines Systems keine Arbeit übertragen werden kann, lässt es sich als *rigid* bezeichnen.² Geschlossene Systeme, deren Grenzen durch starre und unverschiebbare Wände gebildet werden, können als rigid angesehen werden, solange die durch Druck- und Temperaturänderungen hervorgerufenen Änderungen der Wände vernachlässigbar sind. Nicht rigid sind Systeme, über deren Grenze durch Wellen, Kolbenstangen oder andere bewegte Teile Arbeit übertragen wird. Rohrleitungsquerschnitte sollen ebenfalls als rigid angesehen werden. Abgeschlossene Systeme sind immer rigid.

Systemgrenzen, über die nur Wärme übertragen werden kann, werden als *diatherm* bezeichnet. Abb. 2.9 gibt noch einmal einen Überblick über die behandelten Systemarten.

Systemgrenzen Die Grenzen von Systemen werden so festgelegt, wie es für eine Betrachtung zweckmäßig ist. Die Grenzen können durch die Oberfläche eines festen Körpers oder

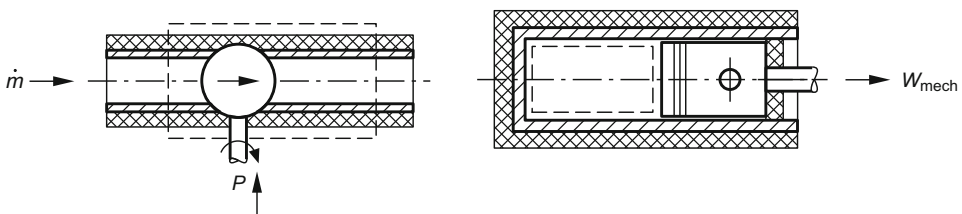


Abb. 2.8 Adiabates offenes System und adiabates geschlossenes System

² Die Bezeichnung *adiabat* für Systemgrenzen, über die keine Wärme fließen kann, ist fest eingeführt. Merkwürdigerweise findet sich in der Literatur für Systemgrenzen, über die keine Arbeit transportiert werden kann, kein entsprechender Ausdruck, allenfalls das Wort *arbeitsdicht*. Es bietet sich ein Begriff mit der Bezeichnung *rigid* an, bei dessen Definition aber der Transport von Schubarbeit ausgeschlossen werden muss, da er sonst nicht auf offene Systeme angewendet werden kann.

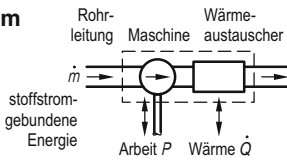
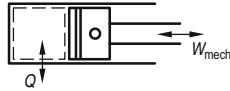
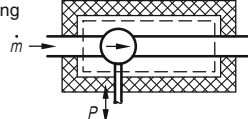
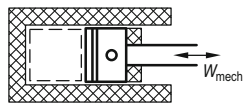
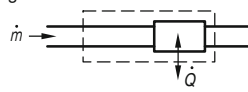
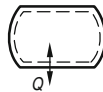
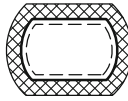
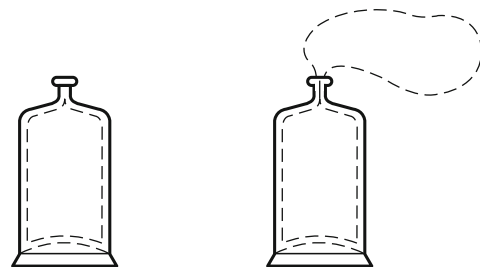
<p>Offene Systeme grenzen einen bestimmten Raum ab</p>	<p>Geschlossene Systeme grenzen eine bestimmte Menge Stoff ab</p>
<p>Offenes System Allgemeiner Fall des thermodynamischen Systems</p> 	<p>Geschlossenes System Keine Stoffübertragung</p> 
<p>Adiabates offenes System Keine Wärmeübertragung</p> 	<p>Adiabates geschlossenes System Keine Wärmeübertragung</p> 
<p>Rigides offenes System Keine Arbeitsübertragung</p> 	<p>Rigides geschlossenes System Keine Arbeitsübertragung</p> 
<p>Abgeschlossenes System Keine Stoffübertragung Keine Energieübertragung</p> 	

Abb. 2.9 Systemarten

Thermodynamische Systeme tauschen im allgemeinen Fall mit ihrer Umgebung Stoff, Arbeit, Wärme und stoffstromgebundene Energie aus. Werden einzelne dieser Wechselwirkungen ausgeschlossen, ergeben sich die verschiedenen Systemarten.

Abb. 2.10 Inhalt einer Gasflasche als geschlossenes System

Die Systemgrenze wandert beim Ausströmen mit und umschließt (in Gedanken) weiterhin die Füllmenge.



einer Flüssigkeit, durch einen Rohrleitungsquerschnitt oder einen Wellenquerschnitt oder auch durch eine nur gedachte Fläche gebildet werden.

Offene Systeme grenzen einen bestimmten Raum ab (und werden daher auch als *Kontrollraum* bezeichnet). Ihre Lage ändert sich nicht.

Geschlossene Systeme grenzen eine bestimmte Menge Stoff ab, und ihre Grenzen können mit der Ausdehnung des Stoffes ihre Lage ändern (Abb. 2.10).

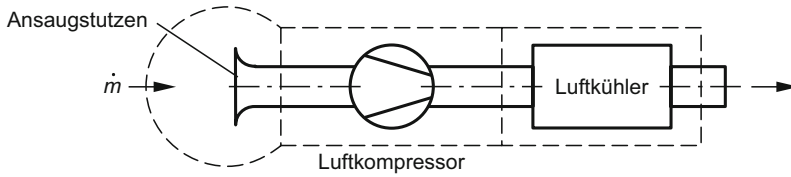


Abb. 2.11 Druckluftanlage als offenes Gesamtsystem

Das Gesamtsystem Druckluftanlage ist in die Teilsysteme Ansaugstutzen, Luftkompressor und Luftkühler unterteilt. Die Teilgrenzen sind dorthin gelegt, wo der Zustand der Luft leicht gemessen werden kann.

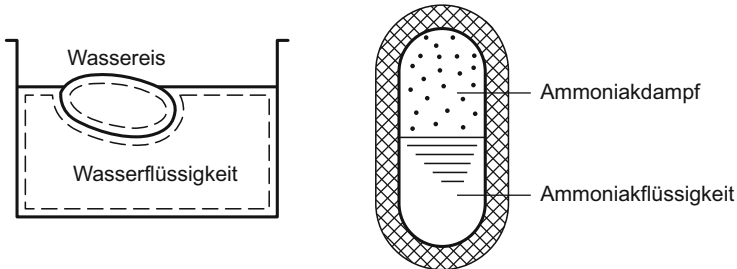


Abb. 2.12 Beispiele für Zweiphasensysteme

Teilsysteme und Gesamtsystem Es kann zweckmäßig sein, in einem zu untersuchenden System Teilsysteme abzugrenzen oder mehrere (Teil-) Systeme zu einem Gesamtsystem zusammenzufassen (Abb. 2.11).

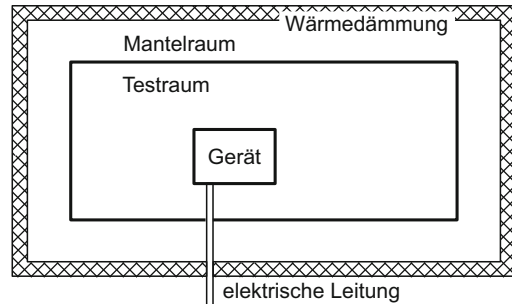
Mehrphasensysteme Ein geschlossenes System, in dem Druck, Temperatur, Dichte und die anderen physikalischen Größen überall den gleichen Wert haben, nennt man *homogen*. Ist dies nicht der Fall, spricht man von einem *heterogenen* System.

Ein homogenes System besteht immer nur aus einer Phase. Heterogene Systeme können aus mehreren Phasen, also mehreren homogenen Teilsystemen zusammengesetzt sein. Besonders häufig trifft man auf Zweiphasensysteme wie in Abb. 2.12.

Beispiel 2.1

Ein elektrisches Gerät wird in einem Testraum untersucht (Abb. 2.13). Der Testraum ist von einem Mantelraum umgeben, dessen Temperatur t_M ständig auf der Temperatur t_R des Testraumes gehalten wird. Die Trennwand zwischen Testraum und Mantelraum ist luftdicht, aber wärmedurchlässig. Der Mantelraum ist gegenüber der Umgebung durch eine Wärmedämmung abgeschlossen. Das Gerät wird durch eine Leitung mit elektrischer Energie versorgt.

Abb. 2.13 Untersuchungs-
anlage



Das System Testraum ist ein geschlossenes System, da kein Stoffstrom über die Grenze fließt. Es kann als adiabat angesehen werden, da die beiden Temperaturen t_M und t_R gleichgehalten werden. Das System ist nicht rigid, da elektrische Arbeit über die Systemgrenze fließt. Es hängt von der zugeführten Leistung im Verhältnis zu den beteiligten Massen von Gerät und Testanlage ab, ob der Anstieg der Temperaturen vernachlässigt und die Anlage als im Beharrungszustand befindlich angesehen werden kann.

2.2 Gleichgewicht und Beharrungszustand

Die thermodynamische Beschreibung eines geschlossenen Systems wird sich dann als besonders einfach erweisen, wenn es sich im Gleichgewicht befindet. Dem entspricht bei einem offenen System der Beharrungszustand.

Gleichgewichtssatz Nach unserer Erfahrung strebt jedes sich selbst überlassene geschlossene System einem Gleichgewichtszustand zu, den es niemals ohne Einwirkung von außen verlässt.

Ein geschlossenes System befindet sich dann in einem Gleichgewichtszustand, wenn sich seine Eigenschaften zeitlich nicht ändern und räumlich nicht verschieden sind. Beispielsweise müssen Druck und Temperatur im System überall gleich sein und dürfen sich auch nicht ändern.

Es ist zweckmäßig, zwischen verschiedenen Arten von Gleichgewicht zu unterscheiden. Dabei spielen die Eigenschaften der Wand, die System und Umgebung oder die zwei Systeme trennt, die entscheidende Rolle.

Wenn zwei geschlossene Systeme mit zunächst unterschiedlichen Drücken durch eine biegsame oder verschiebbare Wand getrennt sind, wird nach unserer Erfahrung ein Druckausgleich stattfinden. Die beiden Systeme kommen durch diesen Ausgleichsvorgang in mechanisches Gleichgewicht (Abb. 2.14).

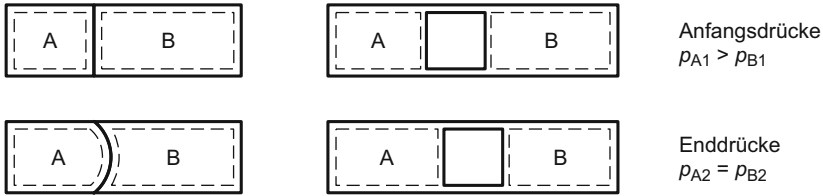


Abb. 2.14 Zum mechanischen Gleichgewicht

Zwischen den Systemen A und B stellt sich durch Verbiegen oder Verschieben der Trennwand mechanisches Gleichgewicht ein. (Die Trennwand soll selber keine Energie aufnehmen.)

Abb. 2.15 Rigide Wand

Eine rigide Wand verhindert Druckausgleich und damit mechanisches Gleichgewicht zwischen den Systemen A und B.

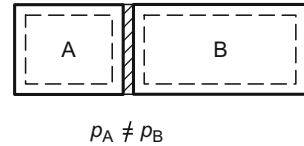
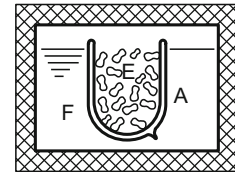
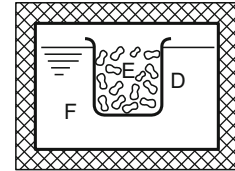


Abb. 2.16 Zum thermischen Gleichgewicht

- System E Wassereis unterhalb der Erstarrungstemperatur
- System F Wasserflüssigkeit oberhalb der Erstarrungstemperatur
- Wand D Becherglas
- Wand A Dewar-Gefäß (Thermosflasche)

Das Gesamtsystem ist thermisch gegen die Umgebung isoliert.

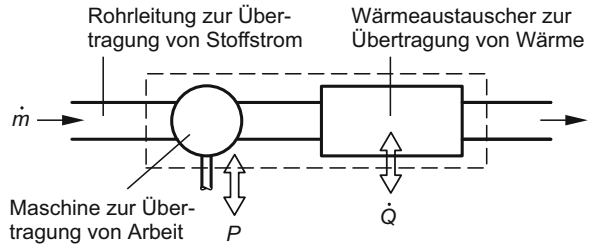


Eine starre oder unverschiebbare Wand zwischen zwei Systemen verhindert den Druckausgleich; es kann keine Arbeit zwischen den beiden Systemen übertragen werden. Eine solche Wand bewirkt, dass sich kein mechanisches Gleichgewicht einstellt. Man kann sie kurz als *rigide Wand* bezeichnen (Abb. 2.15).

Ganz entsprechend entscheiden die Eigenschaften der Trennwand zwischen Systemen verschiedener Temperatur darüber, ob zwischen diesen Systemen Wärme übertragen werden kann und damit ein Temperatúrausgleich stattfindet. Eine Wand, die den thermischen Ausgleich und damit die Einstellung eines *thermischen Gleichgewichts*, also eine Übertragung von Wärme verhindert, wird als *adiabate Wand* bezeichnet (Abb. 2.16). Eine Wand, die den thermischen Ausgleich zulässt, heißt *diatherme Wand*.

Von einem *thermodynamischen Gleichgewicht* spricht man, wenn sich zwei geschlossene Systeme nicht nur im mechanischen und thermischen, sondern auch im chemischen Gleichgewicht befinden. Wenn die beiden Systeme Stoffe enthalten, die miteinander chemisch reagieren, kann dies durch eine undurchlässige Trennwand unterbunden werden.

Abb. 2.17 Zum Beharrungszustand eines offenen Systems



Fehlt die Trennwand oder ist sie durchlässig, so läuft die Reaktion so lange, bis ein chemisches Gleichgewicht erreicht ist. Solche Vorgänge gehören jedoch in den Bereich der Chemischen Thermodynamik und sollen hier nicht weiter behandelt werden.

Beharrungszustand Die Frage nach dem Gleichgewicht führt bei offenen Systemen zu der Feststellung, dass offene Systeme nie sich selbst überlassen sind. Schon ein einziger durchfließender Stoffstrom bedeutet eine dauernde Wechselwirkung mit der Umgebung (Abb. 2.17).

Es gibt aber auch für offene Systeme eine Bedingung entsprechend dem Gleichgewicht, bei der Beschreibung und Berechnung einfach werden. Dies ist der Fall, wenn in dem offenen System nur stationäre Prozesse ablaufen, also solche Prozesse, die sich im Laufe der Zeit nicht ändern. Solche Systeme befinden sich im *Beharrungszustand*.

Ob sich ein System im Beharrungszustand befindet, kann an der Systemgrenze kontrolliert werden. Zum einen dürfen sich die Stoffströme und die Energieströme in ihrem Betrag und in ihrem Zustand zeitlich nicht ändern. Zum anderen muss so viel an Stoff und an Energie aus dem System hinausfließen, wie hineingeströmt ist; eine Aufladung oder eine Entladung würde eine zeitliche Änderung bedeuten, also einen Beharrungszustand verhindern.

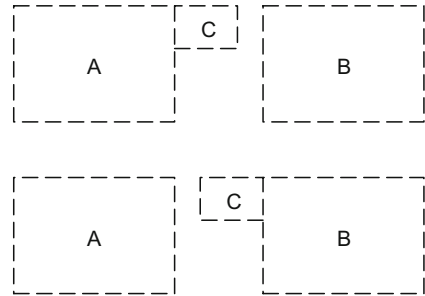
Nullter Hauptsatz Der Druck p war als kennzeichnende Größe für das mechanische Gleichgewicht fluidgefüllter Systeme erkannt worden. In der Mechanik wird die Gleichheit der Drücke auf das Gleichgewicht von Kräften zurückgeführt. Daraus lässt sich die folgende, ebenfalls unserer Erfahrung entsprechende Aussage ableiten.

Ein System A wird mit einem System C so verbunden, dass sich mechanisches Gleichgewicht zwischen den beiden Systemen einstellt.

Dann wird das System C, ohne dass in ihm Veränderungen eintreten, mit dem System B verbunden (Abb. 2.18). Aus dem Gleichgewicht zwischen den Systemen A und C sowie dem Gleichgewicht zwischen den Systemen B und C schließen wir, dass sich auch A und B miteinander im Gleichgewicht befinden. Das System C ist das Messgerät für das mechanische Gleichgewicht. Zeigt es bei der Verbindung mit den Systemen A und B den gleichen Druck an, so sind diese beiden Systeme untereinander im mechanischen Gleichgewicht.

Abb. 2.18 Zur Ermittlung des mechanischen und des thermischen Gleichgewichts zwischen zwei sich nicht berührenden Systemen

A, B Zu untersuchende Systeme
C Kleines System als Messgerät



Trotz des so festgestellten mechanischen Gleichgewichts kann es bei einer Berührung der Systeme A und B zu Zustandsänderungen in ihnen kommen. Diese sind erst ausgeschlossen, wenn außerdem die Bedingung thermischen Gleichgewichts erfüllt ist.

Um zu ermitteln, ob sich die Systeme A und B im thermischen Gleichgewicht befinden, wird ein System C (aber in anderer Ausführung als im vorhergehenden Versuch) mit dem System A so lange in thermischen Kontakt gebracht, bis sich ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Anschließend kommt das System C mit dem System B in thermischen Kontakt. Zeigt sich dabei keine Zustandsänderung im System C, sind also B und C im thermischen Gleichgewicht, so wird daraus geschlossen, dass sich auch die Systeme A und B miteinander im thermischen Gleichgewicht befinden.

Die vom System C zu messende Größe, die anzeigt, ob thermisches Gleichgewicht vorliegt oder nicht, nennen wir *Temperatur* und das System C *Thermometer*. Die beschriebene Erfahrung wird als *Nullter Hauptsatz der Thermodynamik* bezeichnet.

Zwei geschlossene Systeme, die jedes für sich mit einem dritten im thermischen Gleichgewicht sind, stehen auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

Zwei geschlossene Systeme sind im thermischen Gleichgewicht miteinander, wenn beide die gleiche Temperatur haben.

Zwei geschlossene Systeme sind nicht im thermischen Gleichgewicht miteinander, wenn sie verschiedene Temperaturen haben.

Seine merkwürdige Nummerierung verdankt dieser Erfahrungssatz dem Umstand, dass er sachlich vor dem Ersten Hauptsatz einzuordnen ist, aber erst nach diesem erkannt wurde.

2.3 Stoff und Menge

Wie beschreibt man Stoffe nach Art, Menge und Ausdehnung?

Um einen Stoff vollständig zu beschreiben, der in einem geschlossenen System enthalten ist, sind Angaben über die Art des Stoffes, dessen Menge und dessen Zustand notwendig (Abb. 2.19).

Art Die Art eines Stoffes wird durch eine Wortbezeichnung wie Luft oder Ammoniak oder durch eine chemische Formel beschrieben. Wir wollen uns auf reine Stoffe beschränken, also Elemente wie Helium, Verbindungen wie Kohlenmonoxid oder Gemische wie Luft. Chemische Reaktionen sollen nicht auftreten. Die Zusammensetzung der Stoffe soll unverändert bleiben, ausgenommen bei der Behandlung der Gas- und Gas-Dampf-Gemische im Kap. 8 sowie der Verbrennungsprozesse im Kap. 11.

Menge Die Menge eines Stoffes lässt sich durch dessen Masse m oder dessen Stoffmenge n angeben. Die Masse m wird durch Wägung bestimmt und ist uns als Mengenangabe geläufig.

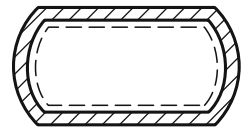
Die Stoffmenge n ist ein Maß für die Anzahl der Teilchen, aus denen die Menge des Stoffes besteht. Als Einheit hat man diejenige Anzahl von Teilchen definiert, aus denen 12 Kilogramm des Kohlenstoff-Isotops ^{12}C bestehen. Diese Einheit heißt *Kilomol*. Die in einem Kilomol enthaltene Anzahl von Teilchen (Atome oder Moleküle oder Teilchen anderer Art) wird als *AVOGADRO-Konstante* N_A bezeichnet.

$$N_A = (6,0220943 \cdot 10^{26} \pm 6,32 \cdot 10^{20}) \text{ kmol}^{-1} \quad (2.1)$$

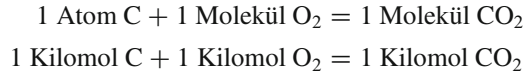
Die Stoffmenge ist eine Größe, die besonders für thermodynamische Berechnungen chemischer Prozesse geeignet ist. Die chemische Reaktionsgleichung



Abb. 2.19 Gas in einem Behälter als Beispiel eines geschlossenen Systems



kann man auch als Stoffmengen-Gleichung lesen.



Die Masse m und die Stoffmenge n sind durch die Beziehung

$$m = M \cdot n \quad (2.3)$$

miteinander verknüpft, wobei der Proportionalitätsfaktor M die Masse einer Teilchenmenge von 1 Kilomol angibt und als *Molmasse* M bezeichnet wird. Der Wert der Molmasse M ist von der Masse der einzelnen Teilchen abhängig, also für jeden Stoff anders. Die Molmasse M ist eine stoffabhängige Konstante (Tab. T-3 und T-4 im Anhang).

Ausdehnung Auch das *Volumen* V als Maß für den Raumbedarf eines Gases enthält eine Mengenangabe. Um den Raumbedarf unabhängig von der Menge des Stoffes angeben zu können, bezieht man das Volumen V auf die Masse m oder die Stoffmenge n .

Das massebezogene Volumen heißt

$$\text{spezifisches Volumen } \nu \equiv \frac{V}{m}. \quad (2.4)$$

Das stoffmengenbezogene Volumen heißt *molares Volumen* oder

$$\text{Molvolumen } V_m \equiv \frac{V}{n}. \quad (2.5)$$

Das Zeichen \equiv ist zu lesen als „ist erklärt als“.

Spezifisch bedeutet in der Thermodynamik *auf die Masse bezogen*. Zur Unterscheidung vom spezifischen und vom molaren Volumen soll das mengenabhängige Volumen als

$$\text{extensives Volumen } V$$

bezeichnet werden. Die Umrechnung von spezifischen und molaren Volumen ergibt sich aus den Gln. (2.4) und (2.5).

$$\nu \equiv \frac{V}{m} = \frac{V}{M \cdot n} = \frac{V_m}{M} \quad (2.6)$$

Extensive, spezifische und molare Größen müssen oft ineinander umgerechnet werden, so wie es hier für das Volumen gezeigt worden ist. Extensive Größen werden grundsätzlich mit großen Buchstaben, zum Beispiel V , geschrieben – nur m und n bilden hier Ausnahmen. Für spezifische Größen werden kleine Buchstaben, im Beispiel ν , verwendet und für molare Größen wieder große Buchstaben mit dem Index m , also im Beispiel V_m .

Das spezifische Volumen v ist der Kehrwert der Dichte ρ .

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (2.7)$$

Die *Dichte* war schon früher als die volumenbezogene Masse erklärt worden.

$$\rho \equiv \frac{m}{V} \quad (2.8)$$

Beispiel 2.2

Ein Druckbehälter mit einem Rauminhalt von $7,36 \text{ m}^3$ enthält 1370 kg Ethan (C_2H_6).

Welche Werte haben spezifisches Volumen, Dichte und Molvolumen? Welche Stoffmenge befindet sich im Behälter?

Daten

Rauminhalt $V = 7,36 \text{ m}^3$

Ethanmasse $m = 1370 \text{ kg}$

Molmasse $M = 30,05 \text{ kg/kmol}$

Spezifisches Volumen v , Dichte ρ und Molvolumen V_m [Gln. (2.6), (2.7) und (2.8)]

$$v = \frac{V}{m} = \frac{7,36 \text{ m}^3}{1370 \text{ kg}} = 5,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{5,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 186 \text{ kg/m}^3$$

$$V_m = M \cdot v = 30,05 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \cdot 5,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} = 0,161 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

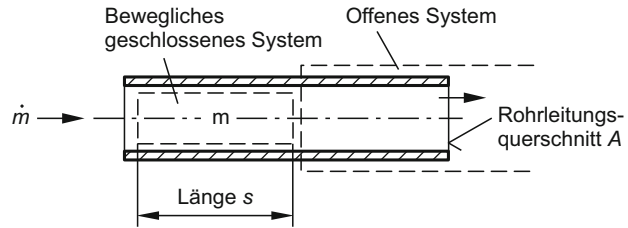
Stoffmenge n [Gl. (2.3)]

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1370 \text{ kg}}{30,05 \text{ kg/kmol}} = 45,6 \text{ kmol}$$

Mengenströme Bei der Behandlung offener Systeme braucht man Größen, die die Mengenströme beschreiben, die über die Systemgrenze fließen. Man bezieht daher die bisher benutzten Mengengrößen auf die Zeitspanne und kennzeichnet diese Stromgrößen durch einen darüber gesetzten Punkt (entsprechend dem mathematischen Symbol für die Ableitung nach der Zeit).

Massenstrom \dot{m} , Stoffmengenstrom \dot{n} , Volumenstrom \dot{V}

Abb. 2.20 Ein bewegliches geschlossenes System überquert die Grenze eines offenen Systems



Die Verbindung zwischen Mengen und Mengenströmen lässt sich herstellen, wenn man ein kleines bewegliches geschlossenes System mit der Masse m betrachtet, das während einer Zeitspanne $\Delta\tau$ über die Grenze eines offenen Systems strömt (Abb. 2.20).

$$\frac{m}{\Delta\tau} = \dot{m} \quad (2.9)$$

Die Geschwindigkeit c ist über die Länge s des geschlossenen Systems, die Zeitspanne $\Delta\tau$ und den Rohrleitungsquerschnitt A mit dem Volumenstrom \dot{V} verknüpft.

$$c = \frac{s}{\Delta\tau} = \frac{V}{A \cdot \Delta\tau} = \frac{\dot{V}}{A} \quad (2.10)$$

Daraus ergibt sich der Volumenstrom \dot{V} mit

$$\dot{V} = A \cdot c. \quad (2.11)$$

Die Verknüpfung des Massenstromes \dot{m} mit dem Stoffmengenstrom \dot{n} und dem Volumenstrom \dot{V} erfolgt analog zu den Gln. (2.3), (2.4) und (2.8).

$$\dot{m} = M \cdot \dot{n} \quad (2.12)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} = \rho \cdot \dot{V} \quad (2.13)$$

Nach Gl. (2.11) ist die Geschwindigkeit c gleich dem Quotienten aus Volumenstrom \dot{V} und Strömungsquerschnitt A . Der entsprechende Quotient aus Massenstrom \dot{m} und Strömungsquerschnitt A wird als *Massenstromdichte* I oder auch als *Massengeschwindigkeit* bezeichnet.

$$I = \frac{\dot{m}}{A} = c \cdot \rho \quad (2.14)$$

Der analoge Begriff *Volumenstromdichte* ist nichts anderes als die *Geschwindigkeit* c .

Bei stationären Prozessen ist der in ein offenes System eintretende Massenstrom \dot{m}_1 gleich dem austretenden Massenstrom \dot{m}_2 .

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= A_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 = A_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 = \dot{m}_2 \\ \dot{m}_1 &= \frac{A_1 \cdot c_1}{v_1} = \frac{A_2 \cdot c_2}{v_2} = \dot{m}_2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Diese Gleichung wird als Kontinuitätsgleichung bezeichnet und vereinfacht sich, wenn eine der Größen A , ρ und c im Eintritt und im Austritt den gleichen Wert hat. Kontinuitätsgleichungen lassen sich für die meisten, jedoch nicht für alle Mengengrößen aufstellen.

Beispiel 2.3

Durch ein konisches Rohr strömt kaltes Wasser. Die mittlere Eintrittsgeschwindigkeit beträgt $0,0632 \text{ m/s}$. Der Eintrittsquerschnitt hat einen Durchmesser von $48,4 \text{ mm}$, der Austrittsquerschnitt von $112,3 \text{ mm}$.

Wie groß sind im Austrittsquerschnitt Massenstrom, Massenstromdichte und Geschwindigkeit?

Daten

Eintrittsgeschwindigkeit	$c_1 = 0,0632 \text{ m/s}$
Austrittsdurchmesser	$d_2 = 11,23 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Eintrittsdurchmesser	$d_1 = 4,84 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Dichte von Wasser	$\rho = 1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Geschwindigkeit c_2 [Gl. (2.15)]

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= A_1 \rho_1 c_1 = A_2 \rho_2 c_2 = \dot{m}_2 & \rho_1 &= \rho_2 & A &= \pi d^2/4 \\ c_2 &= A_1/A_2 \cdot c_1 = d_1^2/d_2^2 \cdot c_1 \\ c_2 &= (4,84 \cdot 10^{-2} \text{ m}/(11,23 \cdot 10^{-2} \text{ m}))^2 \cdot 0,0632 \text{ m/s} = 0,0117 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Massenstrom \dot{m}_2 [Gl. (2.15)]

$$\begin{aligned} \dot{m}_2 &= \dot{m}_1 = \dot{m} = A_1 \rho_1 c_1 = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0632 \text{ m/s} \\ &= 0,116 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Massenstromdichte I_2 [Gl. (2.14)]

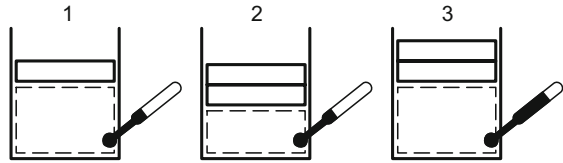
$$I_2 = \dot{m}/A_2 = (0,116 \text{ kg/s})/(9,90 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2) = 11,7 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

2.4 Zustand, Zustandsgrößen und Zustandsdiagramme

Wie beschreibt man die Eigenschaften von Stoffen?

Zustandsgrößen Wenn vom *Zustand* eines Gases in einem geschlossenen System gesprochen wird, wird man damit sofort gewisse Vorstellungen verbinden. Genauer ausgedrückt

Abb. 2.21 Zustandsänderungen eines geschlossenen Systems



soll darunter die Gesamtheit aller physikalischen Eigenschaften des Gases in diesem System verstanden werden. Diese physikalischen Eigenschaften eines Systems werden als *Zustandsgrößen* bezeichnet.

Die Zustandsgrößen sind im Allgemeinen vom Zustand und damit auch voneinander abhängig. So wird es zur Beschreibung des *inneren Zustandes* eines geschlossenen Systems durchweg genügen, zwei Zustandsgrößen wie etwa Druck und Temperatur anzugeben. Dann sind die übrigen Zustandsgrößen wie das spezifische Volumen oder auch der spezifische Energiegehalt ebenfalls festgelegt. Solche Systeme werden als *einfache Systeme* bezeichnet. In diesem Kurs werden nur einfache Systeme behandelt.

Weitere Angaben sind dann nur noch für den *äußeren Zustand* erforderlich, also beispielsweise über die Geschwindigkeit eines Stoffstromes. Hierauf soll jedoch erst später eingegangen werden.

Im Allgemeinen enthalten die Angaben über den Zustand keine Angaben über die Mengen, die im System enthalten sind. Meist ist eine Trennung dieser beiden Angaben zweckmäßig. So kann das Volumen V in eine Mengenangabe mit der Masse m und in eine Zustandsangabe mit dem spezifischen Volumen v aufgespalten werden [Gl. (2.6)].

$$V = m \cdot v$$

Die Abhängigkeit der (inneren) Zustandsgrößen voneinander zeigt sich, wenn durch Einwirkung von außen Änderungen im Zustand eines Systems herbeigeführt werden.

Abb. 2.21 zeigt wieder das schon früher beschriebene Beispiel eines geschlossenen Systems, jedoch ist hier ein Thermometer zur Messung der Temperatur eingebaut. Vergrößert man die Gewichtskraft auf die Kolbenfläche (Zustandsänderung 1–2), so nehmen bei gleichbleibender Temperatur das (extensive) Volumen und damit ebenso spezifisches und molares Volumen ab. Bei einem Erhöhen der Temperatur bei gleichbleibendem Druck (Zustandsänderung 2–3) nehmen die das Volumen beschreibenden Zustandsgrößen wieder zu.

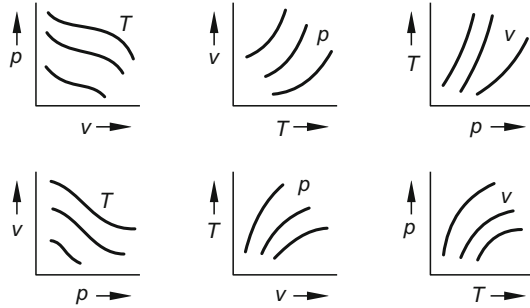
Zustandsgleichung Allgemein gesehen führt jede Änderung einer Zustandsgröße zu einer Änderung der übrigen Zustandsgrößen. Für die thermischen Zustandsgrößen

Druck p , spezifisches Volumen v und Temperatur T

lässt sich diese Abhängigkeit durch die

$$\text{Thermische Zustandsgleichung } F(p, v, T) = 0 \quad (2.16)$$

Abb. 2.22 Zustandsdiagramme der Thermischen Zustandsgleichung



ausdrücken. Die Gl. (2.16) besagt nur, dass es diese Funktion gibt. Wie diese Funktion mathematisch aussieht, kann erst später behandelt werden.

Die Gl. (2.16) ist oben in impliziter Form geschrieben; sie lässt sich in die expliziten Formen

$$p = p(v, T) \quad v = v(p, T) \quad T = T(p, v) \quad (2.17)$$

auffösen. Dabei ist, wie in der Thermodynamik üblich, die Aussage *ist Funktion von* nicht mit $p = f(\dots)$, sondern mit der Wiederholung des Formelzeichens der betreffenden Größe geschrieben, also $p = p(\dots)$. Außerdem soll vermerkt werden, dass die Gl. (2.16) genauer als die *Thermische Zustandsgleichung eines einphasigen ruhenden geschlossenen Systems* zu bezeichnen ist.

Die beiden thermischen Zustandsgrößen Druck p und Temperatur T sind *intensive* Zustandsgrößen. Unterscheiden sich die intensiven Zustandsgrößen in zwei aneinandergrenzenden Systemen, so wird Energie übertragen, wenn es die dazwischenliegende Wand nicht verhindert. So wird Wärmeübertragung infolge einer Temperaturdifferenz durch eine adiabate Wand verhindert und Arbeitsübertragung infolge einer Druckdifferenz durch eine rigide Wand.

Spezifische und molare Größen haben mit den intensiven Größen gemeinsam, dass sie bei einer Teilung eines homogenen geschlossenen Systems ihren Wert behalten.

Zustandsdiagramme Die Thermische Zustandsgleichung lässt sich graphisch darstellen, wenn man zwei der Zustandsgrößen als (kartesische) Koordinaten und die dritte als Parameter benutzt. Danach könnte man die in Abb. 2.22 skizzierten Diagramme zeichnen. Von diesen sechs Diagrammen wird bei Gasen im Wesentlichen nur das p, v -Diagramm verwendet, bei Dämpfen auch das p, T -Diagramm.

Man nennt solche Diagramme *Zustandsdiagramme*. Jeder Punkt stellt einen bestimmten Zustand dar, für den die Werte der Zustandsgrößen wie p_1, v_1, T_1 usw. an den Koordinatenachsen oder an den Parameterlinien abgelesen werden können (Abb. 2.23).

Es ist in der Thermodynamik üblich, die Parameterlinien danach zu bezeichnen, welche Zustandsgröße in ihrem Verlauf konstant bleibt. Diese Bezeichnungen werden auch für die achsparallelen Geraden benutzt, auf denen eine der Koordinaten konstant ist (Abb. 2.24).

Abb. 2.23 p, v -Diagramm mit einer (willkürlich skizzierten) Linie konstanter Temperatur

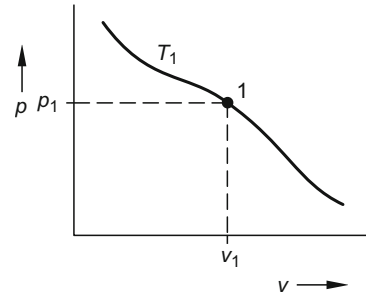
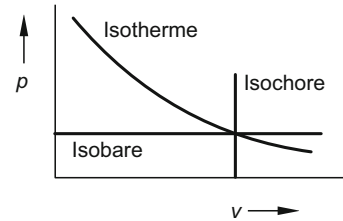


Abb. 2.24 p, v -Diagramm mit Parameterlinien



Es lassen sich die folgenden Iso-Parameterlinien unterscheiden:

Isotherme Linie konstanter Temperatur

Isobare Linie konstanten Druckes

Isochore Linie konstanten (extensiven, spezifischen oder molaren) Volumens

Die Zustandsdiagramme, von denen wir noch weitere kennen lernen werden, sind ein vielgebrauchtes Hilfsmittel des Ingenieurs, weil man sich mit ihrer Hilfe schnell einen Überblick verschaffen kann und außerdem auf graphischem Wege Zahlenwerte mit oft ausreichender Genauigkeit erhält.

2.5 Druck, Temperatur, Energie

Druck und Temperatur scheinen uns aus dem Alltag bekannt, doch gilt es, beim Umgang damit einige Fehler zu vermeiden. Mit den zahlreichen Einheiten für Druck, Temperatur und Energie sollen Sie sich vertraut machen.

Druck Der Druck p in einem geschlossenen System ist gleich der Summe aus dem atmosphärischen Luftdruck p_{amb} und dem Überdruck p_e (Abb. 2.25)³.

$$p = p_{\text{amb}} + p_e \quad (2.18)$$

³ Die Indizes der Formelzeichen für den Druck leiten sich von lateinischen Wörtern ab: abs *absolutus* (losgelöst, unabhängig); amb *ambiens* (umgebend), e *excedens* (überschreitend).

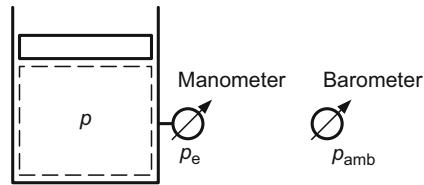


Abb. 2.25 Geschlossenes System mit einem Manometer und einem Barometer

Der Überdruck p_e wird vom Gewicht des Kolbens verursacht und vom Manometer angezeigt.

Das Barometer misst den (absoluten) Druck p_{amb} der atmosphärischen Luft.

Der Druck p wird auch als absoluter Druck p_{abs} bezeichnet und gibt den Druck gegenüber dem Druck Null im leeren Raum an.

Absolutes Vakuum Das absolute Vakuum, den vollkommen leeren Raum, gibt es nur in unserer Vorstellung, weil er sich auch mit noch so großer Anstrengung nicht herstellen lässt. Trotzdem ist es physikalisch richtig, vom absoluten Vakuum als Nullwert des Druckes auszugehen.

Die Druckdifferenz Δp zwischen einem absoluten Druck p_{abs} und dem atmosphärischen Luftdruck p_{amb} heißt *Überdruck* p_e . Wenn in einem Behälter der absolute Druck p unterhalb des Atmosphärendruckes p_{amb} liegt, wird dies durch einen negativen Überdruck p_e angegeben. Das Wort *Unterdruck* wird nur noch beschreibend verwendet (Abb. 2.26).

In der Praxis werden die Indizes bei p_{abs} und p_e häufig weggelassen, so dass bei Druckangaben sorgfältig zu prüfen ist, wie sie gemeint sind.

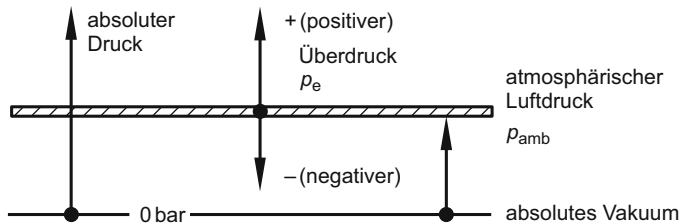


Abb. 2.26 Zusammenhang zwischen Druckgrößen

Atmosphärischer Luftdruck Für den atmosphärischen Luftdruck ist ein Normwert von $p_n = 1,01325 \text{ bar} = 760 \text{ Torr}$ festgelegt. Wetterbedingt treten Schwankungen um $\pm 5\%$ ($\pm 0,05 \text{ bar}$, $\pm 40 \text{ Torr}$) auf. Lässt man einen Fehler von $\pm 1\%$ zu, so können Schwankungen des Luftdrucks oberhalb von etwa 5 bar vernachlässigt werden. Außerdem ist der Einfluss der Ortshöhe zu berücksichtigen.

Druckeinheiten Zur Messung von Drücken haben sich in den verschiedenen Fachgebieten sehr unterschiedliche Druckeinheiten eingebürgert. Selbst bei der Einführung des

Internationalen Maßsystems musste man die beiden Einheiten *Pascal* und *Bar* zulassen, um den Anforderungen einigermaßen entsprechen zu können. Abb. 2.27 zeigt, dass zwischen der kleinsten und der größten Einheit sieben Zehnerpotenzen liegen. Genaue Umrechnungszahlen enthält Tab. T-1 im Anhang.

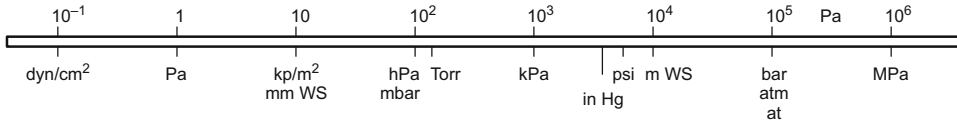


Abb. 2.27 Druckeinheiten im Vergleich

SI-System

Pa	Pascal
hPa	Hektopascal
mbar	Millibar
kPa	Kilopascal
bar	Bar
MPa	Megapascal

Technisches Maßsystem

kp/m ²	Kilopond je Quadratmeter
mm WS	Millimeter Wassersäule
Torr	Millimeter Quecksilbersäule (0 °C)
kp/cm ²	Kilopond je Quadratcentimeter
m WS	Meter Wassersäule
at	Technische Atmosphäre

Physikalisches Maßsystem

dyn/cm ²	Dyn je Quadratcentimeter
atm	Physikalische Atmosphäre

Englisches und amerikanisches Maßsystem

lb/sq. in	Englische Pfund je Quadratzoll
psi	(Pound per square inch)
in Hg	Zoll Quecksilbersäule (inch of mercury)

Beispiel 2.4

Wie groß ist näherungsweise der absolute Druck in dem skizzierten Behälter (Abb. 2.28), wenn das Quecksilbermanometer eine Höhendifferenz von 50 cm anzeigt?

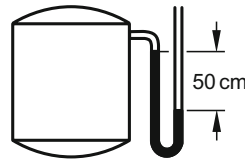


Abb. 2.28 Behälter mit Quecksilbermanometer

Aus Abb. 2.28 geht hervor, dass in dem Behälter Unterdruck herrscht. Bei einem atmosphärischen Luftdruck von geschätzt 750 Torr beträgt der absolute Druck noch 250 Torr gleich etwa 0,33 bar.

Temperatur Für die Temperatur ergibt sich ein ähnliches Bild wie für den Druck (Abb. 2.29). Die absoluten Werte beider Größen werden von einem nicht erreichbaren Nullwert aus gezählt, vom absoluten Vakuum und vom absoluten Nullpunkt aus. Für alltägliche Druck- und Temperaturangaben ist es aber einfacher, vom atmosphärischen Luftdruck und von der Temperatur des schmelzenden Wassereises auszugehen.

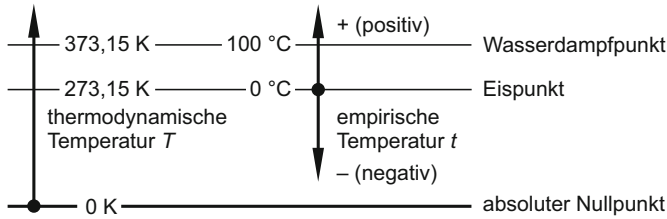


Abb. 2.29 Zusammenhang zwischen Temperaturgrößen

Die *thermodynamische Temperatur*, auch als *absolute Temperatur* oder *Kelvin-Temperatur* bezeichnet, hat das Formelzeichen T , wird vom absoluten Nullpunkt aus gemessen und in *Kelvin* (K) angegeben.

Die *empirische Temperatur*, auch als *Celsius-Temperatur* bezeichnet, wird zur Unterscheidung mit dem Formelzeichen t geschrieben und von der Temperatur T_0 des schmelzenden Wassers aus gemessen.

$$T = t + T_0 \quad (2.19)$$

Die empirische Temperatur wird in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) angegeben. Das Kelvin und der Celsius-Grad sind gleich groß und als $1/273,16$ des Temperaturabstandes zwischen dem absoluten Nullpunkt und dem Tripelpunkt des Wassers (siehe Abschn. 3.5) definiert.

Temperaturwerte lassen sich mit den beiden folgenden Gleichungen ineinander umrechnen.

$$T = \left(\frac{t}{^{\circ}\text{C}} + 273,15 \right) \text{K} \quad (2.20)$$

$$t = \left(\frac{T}{\text{K}} - 273,15 \right) ^{\circ}\text{C} \quad (2.21)$$

Englische Temperaturskalen In der englischen und amerikanischen Literatur wird die empirische Temperatur t häufig noch in *Grad Fahrenheit* (degree Fahrenheit, deg F) und die thermodynamische Temperatur T in *Grad Rankine* (degree Rankine, deg R) angegeben. Der Fahrenheit-Grad und der Rankine-Grad sind etwa halb so groß, genauer $5/9$ so groß wie der Celsius-Grad.

Der Nullpunkt der Fahrenheit-Skala liegt bei etwa -18°C .

$$T = \left(\frac{t}{\text{deg F}} + 459,67 \right) \text{deg R} \quad (2.22)$$

$$t = \frac{5}{9} \left(\frac{t}{\text{deg F}} - 32 \right) ^{\circ}\text{C} \quad (2.23)$$

$$T = \frac{5}{9} \left(\frac{T}{\text{deg R}} \right) \text{K} \quad (2.24)$$

Weitere Gleichungen enthält Tab. T-2 im Anhang.

Beispiel 2.5

Welche empirische Temperatur hat auf der Celsius-Skala und auf der Fahrenheit-Skala den gleichen Zahlenwert?

Mit dem Ansatz $\frac{t_1}{\text{deg F}} = \frac{t_1}{^\circ\text{C}}$ und $\frac{t_1}{^\circ\text{C}} = \frac{5}{9} \left(\frac{t_1}{\text{deg F}} - 32 \right)$ nach Gl. (2.23) ergibt sich

$$\frac{t_1}{\text{deg F}} = \frac{t_1}{^\circ\text{C}} = -40.$$

Normzustand Um druck- und temperaturabhängige Werte wie beispielsweise das spezifische Volumen v und die Dichte ρ miteinander vergleichen zu können, benutzt man die Werte im Normzustand. In DIN 1343 sind dafür die Werte

$$\begin{aligned} \text{Normdruck} \quad p_n &= 1,01325 \text{ bar} \\ \text{Normtemperatur} \quad T_n &= 273,15 \text{ K} \end{aligned} \quad (2.25)$$

festgelegt.

Energieeinheiten Auf die verschiedenen Arten von Energien ist bereits hingewiesen worden und wird in Kap. 4 noch ausführlich einzugehen sein. Hier sollen zunächst die Einheiten vorgestellt werden, die im Internationalen Einheitensystem (SI-System) für alle Energiegrößen in gleicher Weise gebildet werden.

Die Einheit der Energie ergibt sich aus der Definition der Energieform Arbeit als Produkt aus einer Kraft und einem Weg.

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \quad (2.26)$$

Die Einheit von Energieströmen ergibt sich aus der Energieeinheit und der Zeiteinheit.

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \quad (2.27)$$

Häufig werden Energien auf die Masse eines Systems bezogen, also spezifische Energiegrößen gebildet. Diese ergeben sich auch, wenn ein Energiestrom auf einen Massenstrom bezogen wird. Beide bezogenen Größen haben daher die gleiche Einheit.

$$1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{W}}{\text{kg/s}} = 1 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \quad (2.28)$$

In der älteren Literatur trifft man noch häufig auf die früher benutzte Wärmeeinheit *Kilokalorie* (kcal) und die Arbeitseinheit *Meterkilopond* (mkp). Die Wärme, mit der 1 kg Wasser um 1 °C erwärmt werden konnte, war als 1 kcal definiert; dazu wurde die spezifische Wärmekapazität von Wasser willkürlich als 1 kcal/(kg °C) gesetzt. Dieser Wert beträgt im SI-System 4,186 kJ/(kg K).

$$1 \text{ kcal} = \text{kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \cdot 1 ^\circ\text{C} = 1 \text{ kg} \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 1 \text{ K} = 4,186 \text{ kJ} \quad (2.29)$$

Die Wärmeeinheit des englischen Maßsystems *British thermal unit* (BTU) ist in gleicher Weise definiert wie die Kilokalorie, aber natürlich mit den englischen Einheiten *Pfund* (lb) und *Grad Fahrenheit* (deg F).

$$1 \text{ BTU} = 1 \text{ lb} \cdot 1 \frac{\text{BTU}}{\text{lb deg F}} \cdot 1 \text{ deg F} = 0,2520 \text{ kcal} = 1,055 \text{ kJ} \quad (2.30)$$

Da das englische Pfund und das Grad Fahrenheit beide etwa halb so groß wie die entsprechenden SI-Einheiten sind, ist 1 BTU angenähert so groß wie 1/4 kcal und damit wie 1 kJ.

Die aus der Mechanik abgeleitete Einheit Meterkilopond hängt über die NEWTONSche Beziehung zwischen Kraft und Masse mit der SI-Einheit Joule zusammen.

$$1 \text{ mkp} = 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,81 \text{ kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 9,81 \text{ J} \quad (2.31)$$

2.6 Zustandsänderungen, Prozesse

Wie lassen sich Veränderungen von Systemen beschreiben?

Zustandsänderungen Bisher war die Aufmerksamkeit auf die eindeutige Beschreibung des Zustandes eines (geschlossenen) Systems gerichtet. Wie lassen sich Änderungen des Zustandes so festlegen und beschreiben, dass sie rechnerisch verfolgt werden können? Dies soll an einem Gedankenexperiment untersucht werden.

Zwei mit Luft gefüllte geschlossene Systeme A und B sollen die gleiche Füllmenge m enthalten, und auch in Druck p , Temperatur T und spezifischem Volumen v übereinstimmen. Das System A befindet sich in einem durch einen beweglichen Kolben verschlossenen Behälter (Abb. 2.30), das System B in einem starren Behälter. Beide Systeme sind von einem Wasserbad umgeben, in dem ein Rührwerk für Durchmischung des Wassers sorgt und in das ein elektrischer Heizstab eingebaut ist.

In beiden Systemen herrscht Gleichgewicht, sie befinden sich im gleichen Anfangszustand, beschrieben durch die thermischen Zustandsgrößen p_1 , v_1 und T_1 . Dann wird die elektrische Heizung eingeschaltet und so lange betrieben, dass in beiden Systemen eine Temperatur T_2 erreicht wird.

Abb. 2.30 Untersuchung von Zustandsänderungen

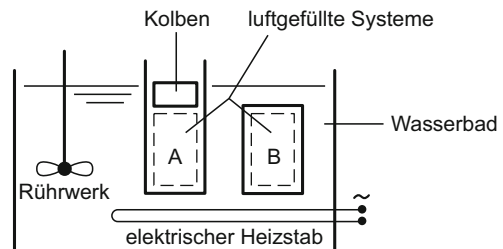
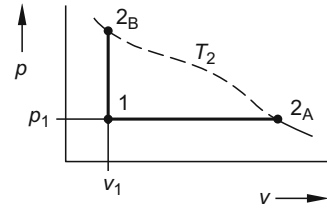


Abb. 2.31 Darstellung der Zustandsänderungen in den Systemen A und B in einem p, v -Diagramm für Luft

1-2_A Isobare Zustandsänderung des Systems A

1-2_B Isochore Zustandsänderung des Systems B



Durch die in Abb. 2.30 dargestellte Versuchsanordnung ist der Ablauf der Zustandsänderung in den beiden Systemen vorgeschrieben. Im System A bleibt der Druck p konstant auf dem Wert, der sich aus Kolbengewicht, Kolbenfläche und atmosphärischem Luftdruck ergibt; jede Steigerung der Temperatur T führt zu einer Volumenzunahme. Im System B verhindert der starre Behälter eine Volumenzunahme der Luft, so dass mit der Temperatur T der Druck p steigt.

Die Zustandsänderungen der beiden Systeme lassen sich in einem Zustandsdiagramm, im p, v -Diagramm, darstellen (Abb. 2.31).

Beide Systeme haben zu Beginn den gleichen Zustand 1 (p_1, v_1, T_1). Die Zustandsänderung verläuft beim System A isobar, beim System B isochor. Die beiden Endzustände 2_A und 2_B liegen auf der gleichen Isothermen T_2 .

Das Gedankenexperiment zeigt, welche Angaben zur eindeutigen Beschreibung der Zustandsänderung eines geschlossenen Systems, gefüllt mit der Masse m eines Stoffes, notwendig sind.

Für die Berechnung einer Zustandsänderung muss ein Gleichgewichtszustand, etwa der Anfangszustand, bekannt sein. Dann muss der Verlauf festgelegt werden, was durch die Versuchsanordnung geschehen kann, und schließlich auch das Ende vorgeschrieben:

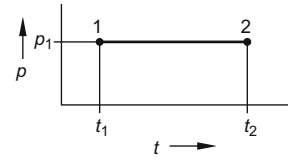
Anfang, Verlauf, Ende.

Statt des Anfangszustandes kann auch der Endzustand vorgegeben werden. Mit den Vorgaben für Verlauf und Endzustand lassen sich alle Zustandsgrößen des Anfangszustandes berechnen.

Prozesse Zustandsänderungen werden häufig auch als Prozesse bezeichnet. Im strengeren Sinn schließt der Begriff *Prozess* auch das Verfahren ein, mit dem der Prozess abläuft.

Mit dem folgenden Gedankenexperiment wird gezeigt, dass eine bestimmte Zustandsänderung mit verschiedenen Prozessen verwirklicht werden kann. Im Beispiel soll ein Stoffstrom \dot{m} beim Druck p_1 von der Temperatur t_1 auf die Temperatur t_2 gebracht werden. Die Darstellung der Zustandsänderung zeigt Abb. 2.32.

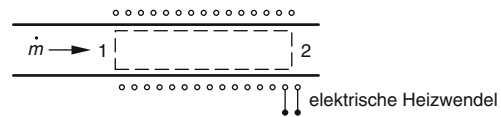
Abb. 2.32 Isobare Zustandsänderung von einer Temperatur t_1 zu einer Temperatur t_2 bei einem Druck p_1 , dargestellt in einem p, t -Diagramm



Die Vorschrift, dass die Zustandsänderung isobar ablaufen soll, lässt sich erfüllen, wenn der Stoffstrom durch eine Rohrleitung strömt, die nicht zu eng und zu lang ist, so dass der Druckverlust vernachlässigt werden kann.

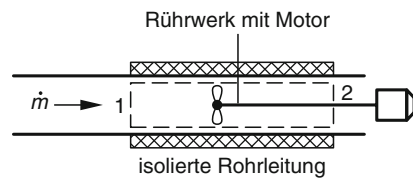
Um eine Temperatursteigerung zu bewirken, denkt man zuerst an eine Wärmezufuhr (Abb. 2.33), die sich am einfachsten durch einen elektrischen Heizwendel verwirklichen lässt.

Abb. 2.33 Isobare Temperatursteigerung durch elektrische Beheizung eines Stoffstroms



Die geforderte Temperatursteigerung lässt sich aber auch durch Zufuhr einer anderen Energie erreichen, beispielsweise durch mechanisch übertragene Energie. Diese Arbeit könnte durch eine Rührwerkswelle über die Systemgrenze fließen (Abb. 2.34).

Abb. 2.34 Isobare Temperatursteigerung durch Arbeitsübertragung an einen Stoffstrom



Damit die Temperatursteigerung nur auf die Arbeitsübertragung zurückzuführen ist und nicht auf eine Wärmeübertragung, wird das Rohr durch Isolierung adiabatisch gemacht. Über die Strömungsquerschnitte wird ebenfalls keine Wärme übertragen, da die Temperatur des Stoffstroms sich beim Überqueren der Grenze nicht ändert, also beidseits einer Systemgrenze gleich ist. Strömungsquerschnitte sind daher grundsätzlich als adiabatisch anzusehen.

Zweiter Hauptsatz Zu einer weiteren Aussage über Zustandsänderungen und Prozesse führt das in Abb. 2.35 dargestellte Gedankenexperiment nach H. D. BAEHR.

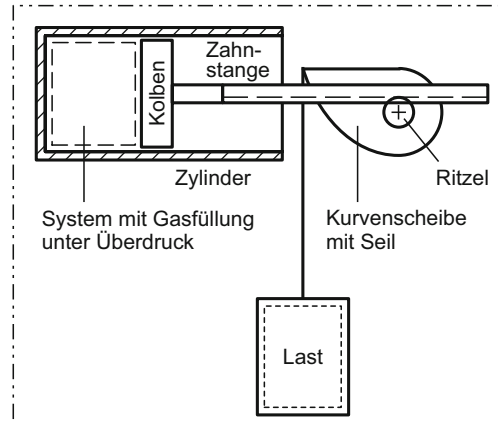
Abb. 2.35 Versuchsanordnung

Gesamtsystem - - - - -

Teilsystem Gas - - - - -

Teilsystem Last ······

Nach [1]



In einem Zylinder Z, der durch einen Kolben K verschlossen ist, befindet sich ein Gas G unter einem (positiven) Überdruck. Die Kolbenstange ist als Zahnstange Z ausgebildet und kämmt mit einem Ritzel R, auf dessen Welle eine Kurvenscheibe S sitzt. An der Kurvenscheibe ist ein Seil befestigt, an dem eine Last L hängt.

Gas G und Last L bilden beide je ein Teilsystem, die gesamte Anordnung ein Gesamtsystem. Die beiden Teilsysteme stehen miteinander im mechanischen Gleichgewicht. Ein kleiner Anstoß bewirkt, dass das sich ausdehnende Gas über die Mechanik mit Zahnstange, Ritzel, Kurvenscheibe und Seil die Last anhebt. Eine Sperre beendet den Vorgang.

Es stellt sich die Frage, ob das Gas wieder in den Anfangszustand kommen kann, wenn der beschriebene Prozess anschließend umgekehrt abläuft. Eingriffe von außen sollen dabei nicht möglich sein (von einem kleinen Anstoß am Anfang abgesehen). Genügen eine gute Dimensionierung der Anlage, eine reichliche Schmierung von Kolben und Mechanik sowie eine völlige Dichtheit zwischen Kolben und Zylinder?

Nach unserer Erfahrung lässt es sich trotz aller konstruktiven und betrieblichen Vorkehrungen nicht erreichen, dass die ursprünglich vom Gas abgegebene Energie vollständig in potentielle Energie des Gewichtsstücks verwandelt werden kann. Bei dem anfänglich beschriebenen und erneut bei dem umgekehrten Prozess wird Energie in die Umgebung fließen, wird dissipiert (zerstreut) und damit nutzlos. Nur für die theoretische Betrachtung eines idealisierten Prozessablaufs kann der Endzustand des Gases gleich dem Anfangszustand gesetzt werden. Die aus diesem Gedankenexperiment gewonnene Aussage führt zu der von H. D. BAEHR 1962 ausgesprochenen Fassung des Zweiten Hauptsatzes.

Alle natürlichen Prozesse sind irreversibel.

Ideale Prozesse sind reversibel gedachte Grenzfälle irreversibler Prozesse.

Als natürliche Prozesse werden hier alle zwischen zwei Gleichgewichtszuständen wirklich ablaufenden Prozesse bezeichnet. Außerdem werden hier zwei Begriffe benutzt, die in der Thermodynamik häufig verwendet werden.

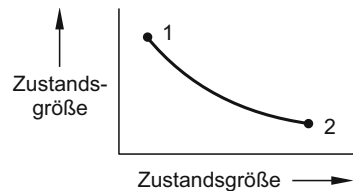
Ein Prozess heißt *irreversibel*, wenn der Anfangszustand des Systems nach Ablaufen des Prozesses ohne bleibende Änderung in der Umgebung nicht wieder herstellbar ist.

Ein Prozess heißt *reversibel*, wenn der Anfangszustand des Systems nach Ablaufen des Prozesses ohne bleibende Änderung in der Umgebung wieder herstellbar ist.

In der Technik ist es üblich, Prozesse zunächst idealisiert zu betrachten und dazu schwer überschaubare Einflüsse zu vernachlässigen. Diese idealen Prozesse sind Grenzfälle natürlicher Prozesse und genügen Bedingungen, die nur näherungsweise erreichbar sind.

Quasistatische Zustandsänderungen In den Abb. 2.31 und 2.32 waren Anfangs- und Endzustände der Systeme durch eine Kurve verbunden worden. Da jeder Punkt in einem Zustandsdiagramm einen Gleichgewichtszustand kennzeichnet, muss eine Kurve als eine Folge von Gleichgewichtszuständen eines Systems verstanden werden (Abb. 2.36).

Abb. 2.36 Verlauf einer Zustandsänderung als Folge von Gleichgewichtszuständen

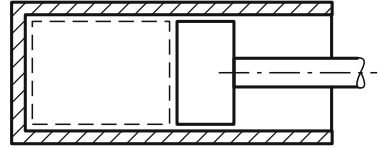


Viele technische Vorgänge laufen langsam genug ab, dass sich stets nahezu Gleichgewichtszustände einstellen. Zustandsänderungen, die mit guter Näherung als eine Folge von Gleichgewichtszuständen angesehen werden können, heißen *quasistatisch*. Ist dies nicht der Fall, spricht man von *nichtstatischen Zustandsänderungen*. Bei diesen sind nur Anfangszustand und Endzustand Gleichgewichtszustände. Zwischenzustände lassen sich nicht angeben und daher auch strenggenommen nicht in Zustandsdiagramme eintragen.

Beispiel 2.6

Mit welcher Geschwindigkeit müsste sich der in Abb. 2.37 dargestellte Kolben bewegen, damit innerhalb des Systems „Gasfüllung“ Druckunterschiede auftreten?

Abb. 2.37 Gasgefülltes System in einem durch Kolben verschlossenen Zylinder

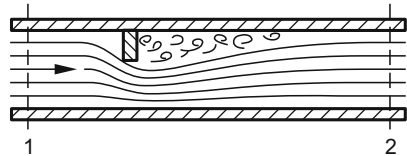


Die üblichen Kolbengeschwindigkeiten in Motoren und Verdichtern reichen dafür nicht aus, da sich Druckänderungen in Gasen mit einigen hundert Meter je Sekunde fortpflanzen; die Kolbengeschwindigkeiten sind kleiner als ein Zehntel davon, sodass man ohne Fehler annehmen darf, dass im System stets Gleichgewicht herrscht.

Beispiel 2.7

Eine nichtstatische Zustandsänderung tritt bei der Strömung durch ein Rohr mit einer plötzlichen Verengung auf, wie sie sich bei Blenden, Ventilen und ähnlichen Einbauten findet (Abb. 2.38).

Abb. 2.38 Strömung durch ein Rohr mit Drosselstelle als Beispiel einer nichtstatischen Zustandsänderung

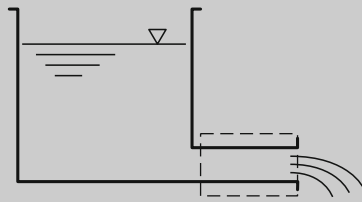


Für den Eintrittsquerschnitt 1 und – bei genügender Entfernung von der Engstelle – auch für den Austrittsquerschnitt 2 kann die aus Volumenstrom und Strömungsquerschnitt errechnete (mittlere) Geschwindigkeit als Zustandsgröße des Stoffstromes angesehen werden. Die Strömung hinter der Verengung hat jedoch keine einheitliche Zustandsgröße „Geschwindigkeit“, weil ein Teil des Strömungsquerschnittes mit Wirbeln ausgefüllt ist. Von einer solchen nichtstatischen Zustandsänderung dürften in ein Zustandsdiagramm eigentlich nur Anfangs- und Endzustand eingetragen werden. Man zeichnet jedoch häufig eine Verbindungslinie ein, die aber keinen wirklichen Zustandsverlauf wiedergibt.

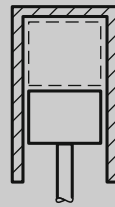
2.7 Fragen und Übungen

Frage 2.1 Beschreiben Sie die Eigenschaften der in Abb. 2.39 skizzierten Systeme mit einem oder, wenn zutreffend, auch mit mehreren der folgenden Begriffe.

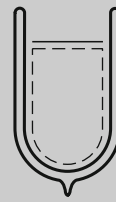
- | | | |
|-------------------|-------------|------------|
| (a) offen | (d) adiabat | (f) ruhend |
| (b) geschlossen | (e) rigid | (g) bewegt |
| (c) abgeschlossen | | |



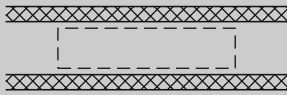
System A
Abflussleitung
an einem Behälter



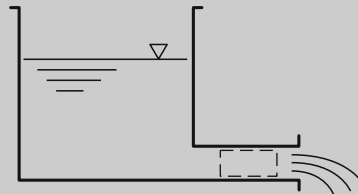
System B
Inhalt eines
Stoßdämpfers



System C
Flüssigkeitsfüllung
eines Dewargefäßes



System D
Teil einer wärme-
gedämmten Rohrleitung



System E
Bestimmte Menge der
ausströmenden Flüssigkeit

Abb. 2.39 Verschiedene Systeme

Frage 2.2 In welchem der Zustandsdiagramme wird eine Isochore als Abszissenparallele dargestellt?

- (a) p, v -Diagramm
(b) v, T -Diagramm
(c) T, p -Diagramm
(d) p, T -Diagramm

Frage 2.3 Wie viel Fahrenheit-Grade hat eine Temperaturdifferenz von 1 Kelvin?

- (a) $0,59^\circ\text{F}$
(b) $0,95^\circ\text{F}$
(c) $5/9^\circ\text{F}$
(d) $9/5^\circ\text{F}$

Frage 2.4 An einem Autoreifen wird von einem handelsüblichen kleinen Manometer ein Überdruck von 2,2 bar angezeigt. Der Atmosphärendruck lässt sich an einem Quecksilberbarometer mit 1,023 bar ablesen. Welchen Wert können Sie für den absoluten Druck im Autoreifen angeben?

- (a) $p = 1,177 \text{ bar}$
(b) $p = 2,2 \text{ bar}$
(c) $p = 3,2 \text{ bar}$
(d) $p = 3,223 \text{ bar}$

Frage 2.5 Wie groß ist das spezifische Volumen von Luft in einem Raum von 25 m^3 , der 30 kg Luft enthält?

- (a) $v = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (c) $v = 1,2 \text{ m}^3/\text{kg}$
 (b) $v = (1/1,2) \text{ m}^3/\text{kg}$ (d) $v = (1/1,2) \text{ kg/m}^3$

Frage 2.6 Welchen Wert hat eine Temperaturdifferenz von 250°C ungefähr in Grad Rankine?

- (a) 125°R (c) 250°R (e) 550°R
 (b) 137°R (d) 450°R

Frage 2.7 Welche Stoffmenge ist in 22 kg CO_2 enthalten? (Die Molmasse von Kohlenstoff ist 12 kg/kmol , die von Sauerstoff 16 kg/kmol .)

- (a) $n = 2 \text{ kmol}$ (c) $n = 0,5 \text{ kmol}$
 (b) $n = 1 \text{ kmol}$ (d) $n = 0,25 \text{ kmol}$

Frage 2.8 Durch die Turbinen eines Kraftwerks strömt in 24 Stunden eine Wassermenge von 514 Millionen Kubikmetern. Wie groß ist der Massenstrom?

- (a) $5,95 \cdot 10^3 \text{ kg/s}$ (d) $77,1 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$
 (b) $5,95 \cdot 10^6 \text{ kg/s}$ (e) $77,1 \cdot 10^{12} \text{ kg/s}$
 (c) $5,95 \text{ kg/s}$ (f) völlig anderer Wert

Frage 2.9 Durch die AVOGADRO-Zahl wird angegeben

- (a) die Anzahl der Moleküle in einem Kilomol. (c) die Energie der Teilchen je Kilomol.
 (b) die Anzahl der Moleküle in einem Kilogramm. (d) keiner der vorstehend beschriebenen Werte.

Frage 2.10 Welche Art von Zustandsgrößen ändert bei der Teilung eines homogenen geschlossenen Systems ihren Wert?

- (a) intensive (c) molare (e) keine der genannten Größen
 (b) extensive (d) spezifische

Frage 2.11 Um die Zustandsänderung eines geschlossenen Systems bekannter Masse rechnerisch verfolgen zu können, werden drei Angaben gebraucht. Was muss angegeben werden?

- (a) Druck, Temperatur, spezifisches Volumen
- (b) Stoffart, Druck, Wärmezufuhr
- (c) Anfangszustand, Temperaturdifferenz, Endzustand
- (d) Anfangszustand, Verlaufsvorschrift, Endvorschrift
- (e) Anfangszustand, Wärmezufuhr, Endvorschrift

Frage 2.12 Was sind spezifische Zustandsgrößen?

- (a) extensive Zustandsgrößen
- (b) intensive Zustandsgrößen
- (c) thermische Zustandsgrößen
- (d) auf die Masse bezogene Zustandsgrößen
- (e) auf die Stoffmenge bezogene Zustandsgrößen

Frage 2.13 Ein offenes System ist gekennzeichnet

- (a) durch eine Öffnung für eine Welle.
- (b) durch einen beweglichen Kolben.
- (c) durch einen Durchsatz von Masse.
- (d) durch Abgabe oder Aufnahme von Arbeit.
- (e) durch keines dieser Kennzeichen.

Frage 2.14 Es sind $0,001 \text{ GW} = 10^p \text{ kg}^q \text{ m}^r \text{ s}^t$. Welche Kombination von Exponenten ist richtig?

- | | p | q | r | t | | p | q | r | t | | p | q | r | t |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|-----|-----|-----|
| (a) | 3 | 1 | 2 | -2 | (c) | 6 | 1 | -2 | 2 | (e) | 9 | 2 | -2 | 3 |
| (b) | 3 | 1 | -2 | -2 | (d) | 6 | 2 | 2 | -3 | (f) | andere Kombinationen | | | |

Frage 2.15 Der absolute Nullpunkt der Temperaturskala liegt bei

- (a) $-273,15 \text{ K}$
- (b) $-273,16 \text{ }^\circ\text{C}$
- (c) $-273,25 \text{ }^\circ\text{C}$
- (d) $0,00 \text{ }^\circ\text{R}$
- (e) $0,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- (f) $0,00 \text{ }^\circ\text{F}$

Frage 2.16 Welche der folgenden Größen kann *nicht* zur Beschreibung der Menge eines Stoffes verwendet werden?

- (a) Stoffmenge
- (b) Masse
- (c) Dichte
- (d) Volumen
- (e) Teilchenzahl

Frage 2.17 Es sind 510°R gleich 10°C .

Wie viel Grad Celsius sind ungefähr gleich 528 Grad Rankine?

(Je nach Genauigkeit der Abschätzung ergibt sich eine andere Antwort.)

- (a) 19°C (c) 28°C (e) 50°C
 (b) 20°C (d) 46°C (f) anderer Wert

Frage 2.18 Welche Größe hat für 1 kmol Wassereis und 1 kmol Benzol den gleichen Wert?

- (a) Zahl der Atome (c) Volumen (e) Masse
 (b) Zahl der Moleküle (d) Molmasse

Frage 2.19 Welche Systemeigenschaft kann für die Untersuchung an einer stark isolierten, von einem Gas durchströmten Rohrleitung immer vorausgesetzt werden?

- (a) geschlossen (c) irreversibel (e) adiabat
 (b) abgeschlossen (d) isochor (f) keine der genannten Eigenschaften

Frage 2.20 Welcher Zusammenhang besteht zwischen einer extensiven Größe X , der entsprechenden spezifischen Größe x und der entsprechenden molaren Größe X_m ? Welche der untenstehenden Gleichungen ist richtig? In den Gleichungen bedeuten m die Masse, M die Molmasse und n die Stoffmenge.

- (a) $x = mX$ (e) $X_m = x/n$
 (b) $x = X/M$ (f) Keine der vorstehenden Gleichungen ist richtig.
 (c) $X_m = nX$
 (d) $X_m = Mx$

Übung 2.1 Durch eine Rohrleitung mit einem Querschnitt von $0,63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ strömt Luft mit einer Geschwindigkeit von $2,4 \text{ m/s}$ und einem spezifischen Volumen von $0,38 \text{ m}^3/\text{kg}$. Nach einem Ventil erweitert sich die Leitung auf einen Querschnitt von $1,26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Durch die Druckänderung ist die Luftdichte auf die Hälfte heruntergegangen. Mit welcher Geschwindigkeit strömt die Luft im größeren Querschnitt?

Lösen Sie diese Aufgabe so weit wie möglich allgemein.

Übung 2.2 Stickstoff siedet unter atmosphärischem Druck bei -196°C .

Welcher Wert ergibt sich dafür in Kelvin, Grad Fahrenheit und Grad Rankine?

Übung 2.3 Rechnen Sie 0,462 MW um in kcal/h und BTU/hr.

Übung 2.4 Rechnen Sie 7438 kJ/kg um in kcal/kg und BTU/lb.

Übung 2.5 An einem Barometer wird ein atmosphärischer Luftdruck von 721,4 Torr abgelesen.

Wie groß ist dieser Druck in bar, Pa, at, atm und psi?



<http://www.springer.com/978-3-658-14300-8>

Thermodynamik für Ingenieure

Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium

Langeheinecke, K.; Kaufmann, A.; Langeheinecke, K.;

Thieleke, G.

2017, XX, 542 S. 300 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-14300-8