

Horst-W. Grollius

# Grundlagen der Pneumatik



4., neu bearbeitete Auflage



HANSER

Grollius  
**Grundlagen der Pneumatik**



Horst-W. Grollius

# Grundlagen der Pneumatik

4., neu bearbeitete Auflage

Mit 121 Abbildungen und 16 Tabellen  
und einem Anhang



**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst-W. Grollius  
Bergische Universität Wuppertal



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-44636-6  
E-Book-ISBN 978-3-446-45548-1

Einbandbild: Festo AG & Co. KG Esslingen

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag  
© 2018 Carl Hanser Verlag München  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Lektorat: Ute Eckardt  
Herstellung: Katrin Wulst  
Einbandrealisierung: Stephan Rönigk  
Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell  
Druck und Bindung: Hubert&Co, Göttingen  
Printed in Germany

# Vorwort

Zum Erhalt der Konkurrenzfähigkeit auf den Weltmärkten ist es für industrialisierte Gesellschaften unverzichtbar, den Automatisierungsgrad von Herstellungsabläufen ständig zu erhöhen, um Produkte in der nachgefragten Menge mit marktgerechten Preisen anbieten zu können. Trotz der damit verbundenen gesellschaftlichen Probleme (Freisetzung von Arbeitskräften, negative Einflüsse auf die Umwelt) besteht zum Zwang der Entwicklung immer effizienterer Technik keine Alternative, da nur die Nationen Mittel für die soziale Absicherung aufbringen können, die sich auf den globalen Märkten behaupten. Den in der Verantwortung stehenden Fachleuten stellen sich damit auch ethische und ökologische Fragen, die es zu beantworten gilt. Insofern sind die von Albert Einstein im Jahre 1931 geäußerten Worte weiterhin aktuell:

*„Die Sorge um den Menschen und ihr Schicksal muss stets Hauptinteresse allen technischen Strebens bilden, die großen ungelösten Fragen der Organisation der Arbeit und der Güterverteilung, damit die Erzeugnisse unseres Geistes dem Menschengeschlecht zum Segen gereichen und nicht zum Fluche. – Vergesst dies nie über Euren Zeichnungen und Gleichungen.“*

Zur Steigerung der Effizienz von Produktions- und Arbeitsabläufen sind Wissen und dessen Anwendung aus vielfältigen Technikdisziplinen erforderlich. Hierzu gehört auch die mit dem Oberbegriff **Fluidtechnik** bezeichnete Disziplin, die sich in **Pneumatik** und **Hydraulik** untergliedert.

Das vorliegende Buch verfolgt die Absicht, den Leser mit den wesentlichen Grundlagen der Pneumatik vertraut zu machen, wobei das Kapitel **Basiswissen** einen breiten Raum einnimmt, in dem insbesondere auf die Grundgleichungen und Grundgesetze der **Thermodynamik** eingegangen wird.

Der gestraffte Umfang des Buches trägt der von **Politik** und **Industrie** geforderten **Reduzierung der Studienzeiten** Rechnung.

Den an Universitäten, Technischen Hochschulen, Fachhochschulen, Techniker und Meisterschulen in der Ausbildung stehenden Studierenden bietet das Buch deshalb die Möglichkeit, sich mit geringem zeitlichen Aufwand **Wissen auf dem Gebiet der Pneumatik** im Selbststudium anzueignen.

Das Buch soll darüber hinaus aber auch für diejenigen hilfreich sein, die als technisch Tätige in der **beruflichen Praxis** stehen und sich grundlegendes Wissen auf dem Gebiet der Pneumatik aneignen bzw. ihr früher erworbenes Wissen auffrischen möchten. Zum Erwerb vertiefter Kenntnisse auf den vielfältigen Gebieten der Pneumatik kann auf das Studium weiterführender Literatur nicht verzichtet werden.

Bei den in Kapitel 13 vorgestellten Aufgaben zu den Grundlagen der Thermodynamik (Aufgaben 1 bis 13) werden die Lösungswege ausführlich erläutert, um Klarheit und leichte Nachvollziehbarkeit sicherzustellen. Die Aufgaben 14 bis 20 beinhalten die Erstellung von Schaltplänen für pneumatische Anlagen. Jeder Schaltplan wird mittels der genormten Symbole nach **DIN ISO 1219-1** dargestellt und dessen Funktionsweise (Ausnahme Aufgabe 20) ausführlich erläutert.

Neben dem Lernen aus Büchern bieten sich den Studierenden heutzutage durch die mediale Vielfalt weitere Möglichkeiten für den Erwerb von Wissen, wodurch leicht der Eindruck entstehen könnte, dass der Wissenserwerb heute weniger Mühe macht als früher. Doch zur „Kultur der Anstrengung“ besteht keine Alternative: Mit Selbstdisziplinierung sind Erkenntnisblockaden zu beseitigen und Verständnisprobleme zu meistern, um so die Genugtuung der den Widerständen abgerungenen eigenen Leistung zu erfahren.

Möge die Beschäftigung mit diesem Buch nicht nur Mühe bereiten, sondern den Leser nach dem Einstieg in die Grundlagen der Pneumatik auch motiviert haben, sich noch tiefer in dieses faszinierende und volkswirtschaftlich bedeutsame Gebiet der Technik einzuarbeiten.

Der Verfasser dankt Frau Ute Eckardt und Frau Katrin Wulst vom Carl Hanser Verlag für die vielen nützlichen Hinweise zur Gestaltung des Buches und die jederzeit gute Zusammenarbeit.

Weiterhin ist zu danken der Firma Technobox (Bochum), deren CAD-Software zur Erstellung von Bildern gedient hat und allen Firmen der Pneumatikindustrie, die Bilder und Diagramme für dieses Buch bereitwillig zur Verfügung stellten. Diese Firmen werden an geeigneter Stelle namentlich genannt.

Köln, im Januar 2018

*Horst-Walter Grollius*

# Inhalt

■	<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
■	<b>Formelzeichen</b> .....	<b>11</b>
1	<b>Einleitung</b> .....	<b>15</b>
2	<b>Basiswissen</b> .....	<b>17</b>
	2.1 Druck, Absolutdruck, Überdruck, Einheiten .....	17
	2.2 Normatmosphäre, Druckluft, Druckbereiche .....	20
	2.3 Thermodynamik – Grundgleichungen und Grundgesetze .....	21
	2.3.1 1. Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme ..	21
	2.3.2 1. Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme .....	25
	2.3.3 1. Hauptsatz der Thermodynamik für stationäre Fließprozesse	26
	2.3.4 Zustand, Zustandsgrößen, Thermische Zustandsgleichungen .	31
	2.3.5 Kalorische Zustandsgleichungen, spezifische Wärme- kapazitäten .....	32
	2.3.6 Zustandsänderungen idealer Gase .....	34
	2.3.6.1 Isotherme Zustandsänderung .....	34
	2.3.6.2 Isobare Zustandsänderung .....	36
	2.3.6.3 Isochore Zustandsänderung .....	38
	2.3.6.4 Adiabate Zustandsänderung .....	40
	2.3.6.5 Isentrope Zustandsänderung .....	43
	2.3.6.6 Polyrope Zustandsänderungen .....	44
	2.3.6.7 Zusammenhang zwischen technischer Arbeit und Volumen- änderungsarbeit .....	47
	2.3.6.8 Zusammenfassung: Zustandsänderungen idealer Gase ....	48
	2.4 Normzustand, Normvolumen und Normvolumenstrom .....	49
	2.5 Kontinuitätsgleichung .....	50
	2.6 Strömungsformen .....	51

---

2.7	Viskosität .....	53
2.8	Druckverluste .....	54
2.9	Feuchte Luft .....	58
<b>3</b>	<b>Durchfluss durch Düsen und pneumatische Komponenten .....</b>	<b>63</b>
3.1	Durchfluss durch Düsen .....	63
3.2	Durchfluss durch pneumatische Komponenten .....	66
<b>4</b>	<b>Genormte Symbole .....</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>Grundsätzliche Struktur von Schaltplänen pneumatischer Systeme, Kennzeichnungen .....</b>	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>Druckluftherzeugung und Druckluftaufbereitung .....</b>	<b>88</b>
6.1	Druckluftherzeugung .....	88
6.2	Druckluftaufbereitung .....	93
<b>7</b>	<b>Zylinder .....</b>	<b>95</b>
7.1	Einfachwirkende Zylinder .....	95
7.1.1	Kolbenstangenzyylinder .....	95
7.1.2	Membran- und Rollmembranzyylinder .....	96
7.1.3	Spannmodule .....	98
7.1.4	Balgzylinder .....	98
7.1.5	Kompaktzylinder .....	99
7.1.6	Kurzhubzylinder .....	100
7.2	Doppeltwirkende Zylinder .....	101
7.2.1	Zylinder mit einseitiger Kolbenstange .....	101
7.2.2	Zylinder mit beidseitiger Kolbenstange .....	103
7.3	Knickungs- und Luftverbrauchsdiagramm .....	104
7.4	Kolbenstangenlose Zylinder .....	105
7.5	Sonderzylinder .....	107
7.6	Drehzylinder .....	108
<b>8</b>	<b>Schwenkmotoren .....</b>	<b>109</b>
8.1	Drehmomente bis 78 Nm .....	109
8.2	Drehmomente bis 260 Nm .....	112

---

<b>9</b>	<b>Druckluftmotoren</b> .....	<b>114</b>
9.1	Kolbenmotoren .....	114
9.2	Lamellenmotoren .....	119
<b>10</b>	<b>Ventile</b> .....	<b>122</b>
10.1	Allgemeines .....	122
10.2	Wegeventile .....	122
10.2.1	Vorbemerkungen .....	122
10.2.2	Sitzventile .....	123
10.2.3	Schieberventile .....	125
10.2.4	Betätigungseinrichtungen .....	127
10.2.5	Vorgesteuerte Wegeventile .....	128
10.3	Sperrventile .....	130
10.3.1	Allgemeines .....	130
10.3.2	Rückschlagventile .....	130
10.3.3	Entsperrbare Rückschlagventile .....	131
10.3.4	Wechselventile .....	133
10.3.5	Zweidruckventile .....	134
10.3.6	Schnellentlüftungsventile .....	135
10.3.7	Absperrventile .....	136
10.4	Druckventile .....	136
10.4.1	Allgemeines .....	136
10.4.2	Druckbegrenzungsventile .....	136
10.4.3	Druckschaltventile .....	137
10.4.4	Druckregelventile .....	137
10.5	Stromventile .....	139
10.5.1	Allgemeines .....	139
10.5.2	Drosselventile .....	139
10.5.3	Drosselrückschlagventile .....	140
10.6	Zeitverzögerungsventile .....	140
<b>11</b>	<b>Hinweise zur Entwicklung pneumatischer Systeme</b> .....	<b>142</b>
<b>12</b>	<b>Grundsaltungen (Auswahl)</b> .....	<b>143</b>
12.1	Saltungen zur Ansteuerung einfachwirkender Zylinder .....	143
12.2	Saltungen zur Ansteuerung doppeltwirkender Zylinder .....	146
12.3	Saltungen zur Geschwindigkeitsregulierung einfachwirkender Zylinder .....	148

12.4	Schaltungen zur Geschwindigkeitsregulierung doppelwirkender Zylinder .....	150
12.5	Schaltungen mit Wechselventil-ODER-Funktion .....	155
12.6	Schaltungen mit Zweidruckventil-UND-Funktion .....	156
12.7	Schaltungen mit Druckschaltventil .....	157
12.8	Schaltungen mit Zeitverzögerungsventil .....	159
<b>13</b>	<b>Aufgaben</b> .....	<b>161</b>
<b>■</b>	<b>Quellen und weiterführende Literatur</b> .....	<b>197</b>
<b>■</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>199</b>
<b>■</b>	<b>Index</b> .....	<b>217</b>

# Formelzeichen

Nachfolgend sind nur die wichtigsten Formelzeichen aufgeführt; weitere im Buch verwendete, die hier nicht genannt sind, werden durch den Text verständlich.

$A$	Fläche
$c$	Geschwindigkeit
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$c_v$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
$\bar{c}_{p12}$	mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck für den Temperaturbereich $T_1$ bis $T_2$
$\bar{c}_{v12}$	mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen für den Temperaturbereich $T_1$ bis $T_2$
$C$	Leitwert
$d$	Rohrdurchmesser
$d_e$	Ersatzdurchmesser, hydraulischer Durchmesser
$E$	Gesamtenergie eines Systems, Energieinhalt
$F$	Kraft
$g$	Fallbeschleunigung
$H$	Enthalpie
$h$	spezifische Enthalpie
$i$	spezifische Dissipationsenergie
$J$	Dissipationsenergie
$k$	absolute Wandraugigkeit
$l$	Rohrlänge
$m$	Masse
$m_{fL}$	Masse ungesättigter feuchter Luft
$m_w$	Wasserdampfmasse
$m_{ws}$	Wasserdampfmasse bei Sättigung
$\dot{m}$	Massenstrom
$\dot{m}^*$	überkritischer Massenstrom

$M_L$	Molmasse trockener Luft
$M_w$	Molmasse von Wasserdampf
$n$	Drehzahl
$\bar{n}$	mittlerer Polytropenexponent
$p$	Druck
$p_c$	atmosphärische Druckdifferenz
$p_{abs}$	Absolutdruck
$p_{amb}$	Atmosphärendruck
$p_{ws}$	Sättigungspartialdruck von Wasserdampf
$p_s$	Dampfdruck von Wasser
$P$	Leistung
$q$	auf die Masse bezogene Wärme
$Q$	Wärme
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$R$	spezielle Gaskonstante
$R_m$	universelle Gaskonstante
$R_L$	spezielle Gaskonstante von trockener Luft
$R_{fl}$	spezielle Gaskonstante von feuchter Luft
$R_{fl,0}$	spezielle Gaskonstante von feuchter Luft im technischen Normzustand
$R_w$	spezielle Gaskonstante von Wasserdampf
$Re$	Reynolds-Zahl
$s$	spezifische Entropie
$t$	Celsius-Temperatur
$T$	Temperatur
$u$	spezifische innere Energie
$U$	innere Energie, Umfang
$v$	spezifisches Volumen
$V$	Volumen
$\dot{V}$	Volumenstrom
$w$	spezifische Arbeit
$w_t$	spezifische technische Arbeit
$W$	Arbeit
$W_t$	technische Arbeit
$W_v$	Volumenänderungsarbeit
$X$	Wassergehalt (Wasserbeladung) feuchter Luft
$z$	geodätische Höhe

---

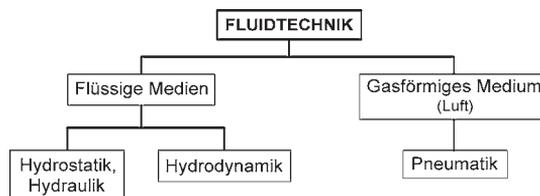
$Z$	Realgasfaktor
$\bar{\gamma}$	mittlerer Adiabatenexponent
$\Delta E_{\text{kin}}$	Änderung der kinetischen Energie
$\Delta E_{\text{pot}}$	Änderung der potenziellen Energie
$\Delta t$	Zeitintervall
$\Delta p$	Druckdifferenz, Druckgefälle, Druckverlust
$\zeta$	Widerstandszahl
$\eta$	dynamische Viskosität
$\bar{\kappa}$	Verhältnis der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten
$\bar{k}$	mittlerer Isentropenexponent
$\lambda_R$	Rohrreibungszahl
$\nu$	kinematische Viskosität
$\rho$	Dichte
$\rho_w$	Dichte von Wasserdampf
$\rho_{wS}$	Dichte von Wasserdampf bei Sättigung
$\varphi$	relative Luftfeuchtigkeit
$\psi$	Ausflussfunktion



# 1

## Einleitung

Die Pneumatik ist ein Teilgebiet der mit dem Oberbegriff **Fluidtechnik** bezeichneten Wissenschaftsdisziplin. Die Fluidtechnik wird anhand der zur Anwendung kommenden Fluide in Hydraulik und Pneumatik (Bild 1.1) eingeteilt. Die in der Hydraulik zur Energieübertragung verwendeten Fluide sind Flüssigkeiten, in der **Pneumatik** wird als Fluid ein Gas verwendet, nämlich verdichtete Luft (Druckluft).



**Bild 1.1** Teilgebiete der Fluidtechnik

Bereits vor mehr als 2000 Jahren fand verdichtete Luft zur Energieübertragung Verwendung. So haben bereits im 3. Jahrhundert vor Chr. *Ktesibios* in Alexandria und *Archimedes* in Syrakus mit Druckluft betriebene Maschinen entwickelt.

Ein in der Literatur oft zitiertes Beispiel für die frühe Anwendung von Druckluft ist die von *Heron* gebaute Anlage zur Öffnung einer Tempeltür (1. Jahrhundert nach Chr.). Zur Druckluftherzeugung diente das Altarfeuer, dessen Wärme die in einem großen Behälter (zur Hälfte mit Wasser gefüllt) befindliche Luft erwärmte. Die sich ausdehnende Luft drückte Wasser aus dem großen Behälter über ein Rohr in einen weiteren, an einem Seilsystem aufgehängten, kleineren Behälter. Sein Absinken als Folge der Gewichtszunahme bewirkte über das Seilsystem das Öffnen der Türen. Nach Erkalten des Altarfeuers zog sich die Luft in dem großen Behälter zusammen und der entstehende Unterdruck saugte Wasser aus dem kleinen in den großen Behälter. Am Seilsystem befestigte Gewichte sorgten für das Schließen der Türen.

In heutiger Zeit ist die Pneumatik vorwiegend in der Automatisierungstechnik zu finden. Weitere Anwendungen der Pneumatik findet man beispielsweise in der Medizin- und Fördertechnik und bei Werkzeugen. Das Spektrum pneumatischer Anwendungen erlebt wegen der vielfältigen Vorzüge der Pneumatik einen stetigen Aufwärtstrend.

Der Energieträger Druckluft bietet folgende Vorteile:

- Druckluft lässt sich leicht über größere Entfernungen durch Rohrleitungen und Schläuche transportieren (nach der Arbeitsverrichtung entweicht die Luft in die Umgebung).
- Druckluft lässt sich speichern und die Druckluftmenge kann dem jeweiligen Bedarf bei intermittierendem Betrieb des Kompressors angepasst werden. Bedarfsspitzen können aus dem Speicher abgedeckt werden. Außerdem ist Druckluft auch in Behältern (Druckluftflaschen) transportierbar.
- Druckluft ist ein sauberer Energieträger. Undichtigkeiten an pneumatisch arbeitenden Anlagen hinterlassen keine Verschmutzungen, was in der Textil- und Nahrungsmittelindustrie unverzichtbar ist.
- mit Druckluft lassen sich Arbeitsbewegungen schnell ausführen. So erlauben Standard-Pneumatikzylinder Kolbengeschwindigkeiten bis ca. 1 m/s, mit Spezialzylindern sind Geschwindigkeiten bis 10 m/s machbar.
- durch mechanische Begrenzung (Anschlag) kann der Hub von Pneumatikzylindern stufenlos begrenzt werden und deren Kraftregulierung ist durch Druckregelung stufenlos zu erreichen. Durch Drosselung des Druckluftstroms lässt sich die Kolbengeschwindigkeit stufenlos beeinflussen.
- mit Pneumatikzylindern lassen sich auf einfache Weise viele Bewegungsaufgaben ohne aufwändige mechanische Übertragungsglieder realisieren.
- Druckluft betriebene Geräte sind überlastsicher, sie können unter Volllast bis zum Stillstand ohne Gefahr der Beschädigung abgebremst werden.
- Druckluft erfüllt ohne besondere Maßnahmen die Forderungen von Explosions- und Brandschutz.
- Druckluft betriebene Geräte sind wegen ihres einfachen technischen Aufbaus leicht zu warten und im Reparaturfall leicht instand zu setzen.

Den vielfältigen Vorteilen der Druckluft stehen auch einige Nachteile gegenüber. Diese sind:

- die Kolbengeschwindigkeiten von Pneumatikzylindern und die Rotationsgeschwindigkeiten von Motoren sind wegen der Kompressibilität der Luft stark von der Belastung abhängig.
- bei niedrigen Kolbengeschwindigkeiten kann es zu „Stick-Slip-Effekten“ kommen.
- am Austritt von Arbeitsgeräten können starke Abluftgeräusche auftreten, die u.U. den Einsatz von Schalldämpfern erforderlich machen.

Im vorliegenden Buch werden für den Begriff **pneumatische Anlage** auch gleichbedeutend die Begriffe **pneumatisches System** oder **pneumatische Steuerung** verwendet.

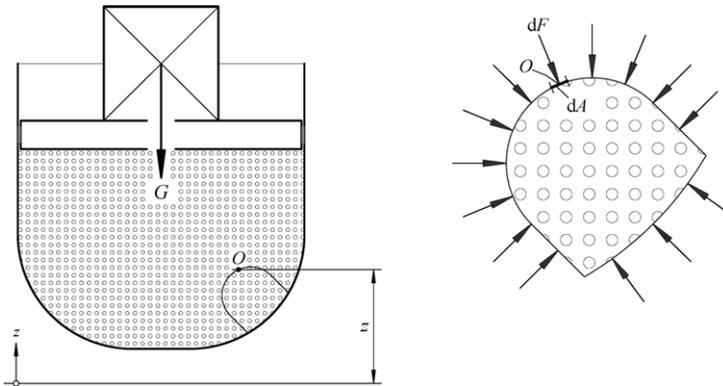
Weiterhin ist anzumerken, dass nicht alle mit *kursiver Schrift* hervorgehobenen Namen auf einen Eintrag im Literaturverzeichnis hinweisen.

# 2

## Basiswissen

### ■ 2.1 Druck, Absolutdruck, Überdruck, Einheiten

Der Druckbegriff soll anhand des Bildes 2.1 erläutert werden. Es zeigt einen mit Gas gefüllten Behälter, der nach oben hin durch einen Kolben, auf dem ein Gewicht lastet, abgeschlossen wird.



**Bild 2.1** Zur Erläuterung des Druckbegriffes

Mit  $O$  wird ein Punkt gekennzeichnet, der auch gleichzeitig ein auf der **Randfläche** des herausgeschnittenen Gasvolumens liegender Punkt ist. An dem am Punkt  $O$  vorliegenden **Flächenelement**  $dA$  greift die **Druckkraft**  $dF$  senkrecht an (Normalkraft). Der **Quotient**

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (2.1)$$

ist die **Druckspannung**, die auch kurz **Druck** genannt wird.

Die Größe des Druckes am Punkt  $O$  ist unabhängig von der Lage der durch den Punkt  $O$  gelegten Schnittebene. Der Druck  $p$  ist somit **richtungsunabhängig** und damit eine **skalare**

physikalische Größe, die nur vom Ort im Gas abhängt. Allerdings spielt bei Gasen wegen ihrer geringen Dichte (im Vergleich mit Flüssigkeiten) die Änderung des Druckes aufgrund unterschiedlicher Höhenlagen  $z$  keine beachtenswerte Rolle, sodass die höhenabhängige Druckänderung vernachlässigt wird. Für den Druck des Gases im Behälter des Bild 2.1 gilt also  $p \approx \text{konst.} \neq p(z)$ .

Die **Maßeinheit** (kurz: Einheit) des Druckes wird unter Verwendung der **Basiseinheiten** des Internationalen Einheitensystems (SI-Maßsystem) **Kilogramm** (Einheitenzeichen: kg), **Meter** (Einheitenzeichen: m) und **Sekunde** (Einheitenzeichen: s) mit **Pascal** (Einheitenzeichen: Pa) festgelegt:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} / \text{m}^2 = 1 \text{ N} / \text{m}^2 \quad (2.2)$$

Da die Einheit Pascal zu hohe Zahlenwerte ergibt, wird in der Praxis häufig die Einheit **Bar** (Einheitenzeichen: bar) verwendet:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2 \quad (2.3)$$

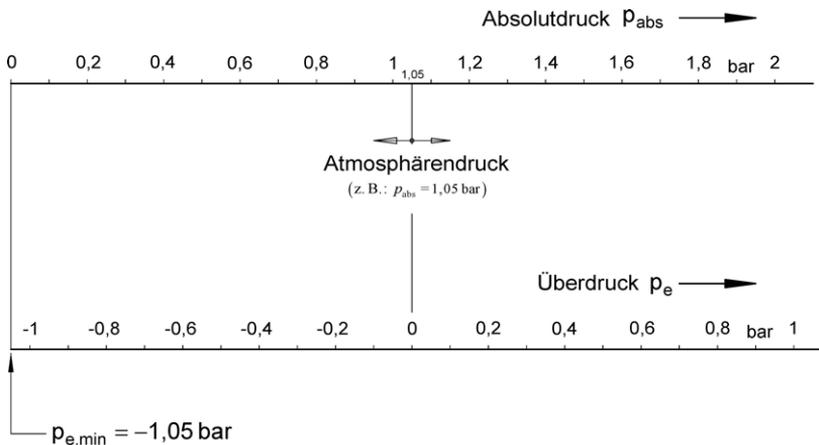
Kleine Drücke werden in **Millibar** (Einheitenzeichen: mbar) oder in **Hektopascal** (Einheitenzeichen: hPa,  $1 \text{ hPa} = 10^2 \text{ Pa}$ ) angegeben:

$$1 \text{ mbar} = 0,001 \text{ bar} = 1 \text{ hPa} \quad (2.4)$$

In den **angelsächsischen Ländern** wird oft noch die Einheit **Psi** (Einheitenzeichen: psi) verwendet:

$$1 \text{ bar} = 14,5 \text{ psi} \quad (2.5)$$

Zur Erläuterung der Begriffe **Absolutdruck** und **Überdruck** dienen die Skalen in Bild 2.2.



**Bild 2.2** Absolutdruckskala und Überdruckskala

Die **Absolutdruckskala** (obere Skala in Bild 2.2) beginnt mit  $p_{\text{abs}} = 0$ , da der Absolutdruck der Druck gegenüber dem **Druck null des leeren Raumes** ist. Die Differenz zwischen einem Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$  und dem aktuell vorliegenden (absoluten) **Atmosphärendruck**  $p_{\text{amb}}$  ist die **atmosphärische Druckdifferenz**

$$p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}} \quad (2.6)$$

die in der Technik mit **Überdruck** bezeichnet wird.

Ist der Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$  größer als der Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$ , nimmt der Überdruck positive Werte an:

$$p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}} > 0 \quad (2.7)$$

Bei einem Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$ , der kleiner als der Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$  ist, wird für den Überdruck ein negativer Wert erhalten:

$$p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}} < 0 \quad (2.8)$$

Der Begriff **Unterdruck**, früher definiert durch die Druckdifferenz  $p_{\text{amb}} - p_{\text{abs}}$  bei einem Absolutdruck, der kleiner als der Atmosphärendruck ist, wird nicht mehr verwendet. Der **Unterdruckbereich** wird nach Gl. (2.8) durch **negative** Werte des **Überdruckes** gekennzeichnet (Unterdruck wird ersetzt durch den Begriff **negativer Überdruck**).

Der **Minimalwert**  $p_{e,\text{min}}$  der negativen Überdruckskala (untere Skala in Bild 2.2) wird durch den aktuell vorliegenden Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$  festgelegt. Liegt beispielsweise ein Atmosphärendruck von  $p_{\text{amb}} = 1,05$  bar vor, gilt für den Minimalwert des negativen Überdruckes ( $p_{\text{abs}} = 0$  bar, leerer Raum):

$$p_{e,\text{min}} = 0 \text{ bar} - 1,05 \text{ bar} = -1,05 \text{ bar} \quad (2.9)$$

Das Beispiel zeigt, dass die **untere Grenze** der negativen Überdruckskala durch den Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$  bestimmt wird.

In der Pneumatik wird meist nicht mit dem Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$ , sondern mit dem Überdruck  $p_e$  gearbeitet.

**Hinweis:** Oft werden die Indizes „abs“ und „e“ zur eindeutigen Kennzeichnung von Absolut- und Überdrücken weggelassen. Für den jeweils vorliegenden Fall ist aus dem Zusammenhang herauszufinden, ob es sich bei der Angabe von Drücken um Absolutdrücke oder Überdrücke handelt.

## ■ 2.2 Normatmosphäre, Druckluft, Druckbereiche

Pneumatische Anlagen benötigen zu ihrem Betrieb Druckluft (verdichtete Luft), die durch eine Verdichteranlage bereitgestellt wird. Die atmosphärische Luft ist ein Gemisch aus Gasen, das größtenteils aus Stickstoff und Sauerstoff besteht. Weiterhin sind darin Kohlendioxid, Wasserstoff, Edelgase und Wasserdampf sowie feste Partikel enthalten.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über Zusammensetzung und Eigenschaften der Luft nach *DIN ISO 2533 Normatmosphäre*.

Hinweis: Bei der Normatmosphäre findet der Wasserdampfgehalt keine Berücksichtigung.

**Tabelle 2.1** Zusammensetzung und Eigenschaften der Luft nach *DIN ISO 2533 Normatmosphäre*

Zusammensetzung		Eigenschaften	
	Volumengehalt %	Gaskonstante	$R_L = 287,05287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Stickstoff	78,084	Molare Masse	$M_L = 28,964420 \text{ kg/kmol}$
Sauerstoff	20,9476	Normdichte (bei $T_N = 288,15 \text{ K}$ ,	$\rho_N = 1,225 \text{ kg/m}^3$ $p_N = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Kohlendioxid	0,0314*		
Wasserstoff	$50 \cdot 10^{-6}$	Dynamische Viskosität (bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )	$\eta \approx 18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Edelgase	0,93695*	Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten	$\bar{\kappa} = 1,4$

\* Diese Werte können sich zeitlich und räumlich ändern.

$R_L = 287,05287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  ist die spezielle Gaskonstante der Luft nach Tabelle 2.1. Dieser Wert gilt für trockene saubere Luft in der Nähe des Meeresniveaus. Bei den meisten in der Pneumatik durchzuführenden Berechnungen kann als Wert für die spezielle Gaskonstante trockener Luft mit genügender Genauigkeit  $R_L = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  verwendet werden.

Luft ist begrenzt in der Lage, Wasser (meist in Form von Wasserdampf) aufzunehmen. Die Menge des Wasserdampfes, die von Luft aufgenommen werden kann, hängt von deren Druck und Temperatur ab. Durch die Verdichtung der Luft hat diese beim Verlassen der Verdichteranlage eine höhere Temperatur als die atmosphärische Luft. Auf dem Weg zur pneumatischen Anlage wird die Druckluft abgekühlt, wobei ein Teil des Wasserdampfes kondensiert. Das Wasser wird aus dem Leitungssystem vor Eintritt in die pneumatische Anlage entfernt (Wasserabscheider), da sonst Korrosionsgefahr besteht und das Betriebsverhalten der pneumatischen Bauteile beeinträchtigt werden kann.

Hinweis: Der Abschnitt 2.9 (Feuchte Luft) befasst sich noch eingehender mit dem Wasserdampfgehalt der Luft.

Die in der Luft vorhandenen festen Partikel, die den Verschleiß der pneumatischen Bauteile begünstigen, lassen sich durch Filter auf ein Mindestmaß reduzieren. Falls pneumatische Geräte aus Funktionsgründen eine Schmierung brauchen, wird der Druckluft Öl in Form von Ölnebel zugegeben.

Eine Klassifizierung pneumatischer Anlagen nach Druckbereichen lässt sich wie folgt vornehmen:

Niederdruckpneumatik:	bis 1,5 bar
Normaldruckpneumatik:	1,5 bar bis 16 bar
Hochdruckpneumatik:	größer 16 bar

Pneumatische Anlagen arbeiten überwiegend im Bereich der Normaldruckpneumatik, also zwischen 1,5 bis 16 bar. Es hat sich herausgestellt, dass Druckluftnetze bei ca. 6 bar am wirtschaftlichsten betrieben werden können.

## ■ 2.3 Thermodynamik – Grundgleichungen und Grundgesetze

Die **Thermodynamik**, die auch als Energielehre bezeichnet wird, lehrt die Energieformen zu unterscheiden und zeigt deren gegenseitige Verknüpfung in den Bilanzgleichungen des 1. Hauptsatzes. Weiterhin klärt der 2. Hauptsatz die Bedingungen und Grenzen für die Umwandlung unterschiedlicher Energieformen bei technischen Prozessen.

Um das Verständnis von thermodynamischen Vorgängen in pneumatischen Systemen zu fördern, wird hier nur auf einige wenige Grundgleichungen und Grundgesetze näher eingegangen.

**Hinweis:** Für eine gründlichere Beschäftigung mit der Thermodynamik wird auf die Werke von *Baehr*, *Geller* und *Cerbe/Wilhelms* verwiesen.

### 2.3.1 1. Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme

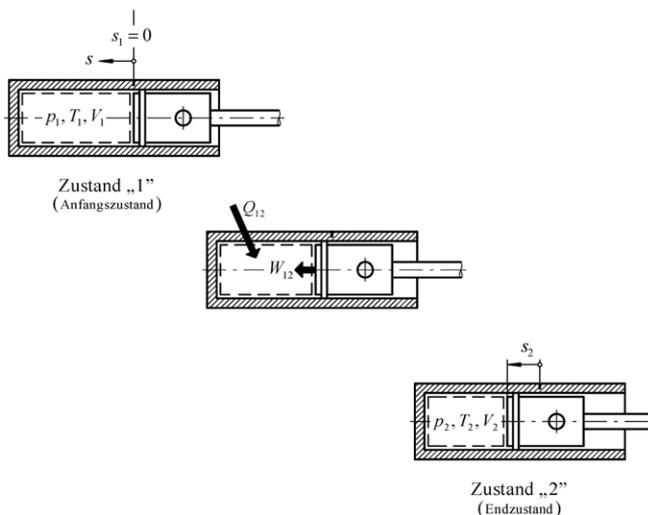
Über die Grenzen **geschlossener Systeme** fließen nur Energieströme, aber keine Stoffströme. Geschlossene Systeme grenzen eine bestimmte Menge Stoff ab. Die sich im System befindende Masse bleibt auch bei einer Zustandsänderung stets konstant ( $m = \text{konst.}$ ).

Bild 2.3 zeigt als Beispiel für ein geschlossenes System das sich in einem Zylinder befindende Gas, welches seitlich durch einen beweglichen Kolben dicht abgeschlossen ist. Durch die Systemgrenze, die als gestrichelte Linie dargestellt ist, wird das betrachtete thermodynamische System (auch Kontrollraum, Bilanzraum oder Bilanzhülle genannt) gegenüber seiner Umgebung abgegrenzt. Im Zustand „1“ nimmt das Gas das Volumen  $V_1$  ein, es steht bei der Temperatur  $T_1$  unter dem Druck  $p_1$ .

Wird der Kolben nach links verschoben und von außen über die Systemgrenze hinweg Wärme zugeführt, so erfährt das Gas eine Änderung seines Zustandes. In der Terminologie der Thermodynamik wird von einer **Zustandsänderung** gesprochen. Das führt zum Zustand „2“, bei dem das Gas das Volumen  $V_2$  einnimmt und bei der Temperatur  $T_2$  unter dem Druck  $p_2$  steht.

Bei einer Zustandsänderung geht also ein thermodynamisches System (hier: das im Zylinder eingeschlossene Gas) von einem Zustand (hier: Zustand „1“) in einen anderen (hier: Zustand „2“) über.

Die dem System des Bild 2.3 insgesamt zugeführte mechanische Arbeit  $W_{12}$  und die zugeführte Wärme  $Q_{12}$  bewirken eine Änderung seines Energieinhaltes. Der Energieinhalt des Gases beim Zustand „1“ wird durch die innere Energie  $U_1$ , der Energieinhalt des Gases beim Zustand „2“ durch die innere Energie  $U_2$  gekennzeichnet.



**Bild 2.3** Geschlossenes thermodynamisches System (hier: Gas in einem Zylinder)

Dieser Sachverhalt lässt sich durch die Gleichung

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 \quad (2.10)$$

ausdrücken; sie stellt die quantitative Formulierung des **1. Hauptsatzes der Thermodynamik** für geschlossene Systeme dar. Sie gilt in dieser Form für Systeme, die keine Änderung ihrer kinetischen und potenziellen Energie erfahren ( $\Delta E_{\text{kin}12} = 0$ ,  $\Delta E_{\text{pot}12} = 0$ ), was im Folgenden stets vorausgesetzt werden soll.

Es bedeuten:  $Q_{12}$  die während der Zustandsänderung von „1“ nach „2“ an das Gas übertragene (transferierte) Wärme,  $W_{12}$  die während der Zustandsänderung von „1“ nach „2“ insgesamt am System verrichtete (zugeführte) mechanische Arbeit,  $U_1$  die innere Energie des Gases im Zustand „1“,  $U_2$  die innere Energie des Gases im Zustand „2“.