

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).

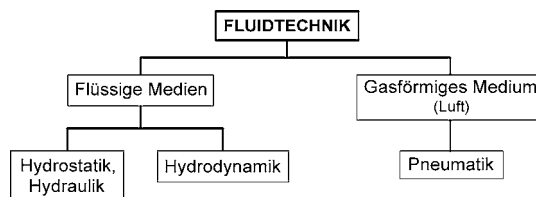


Bild 1.1 Teilgebiete der Fluidtechnik

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.

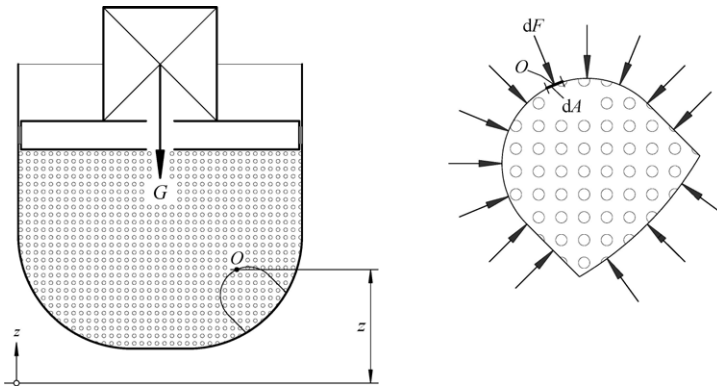


Bild 2.1 Zur Erläuterung des Druckbegriffes

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.

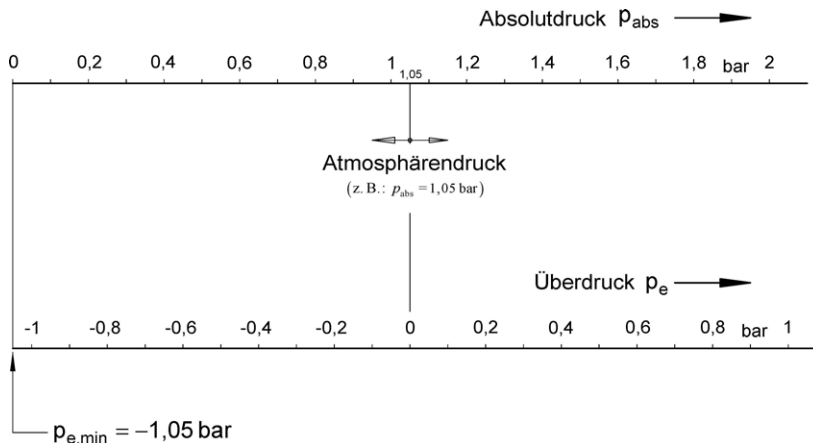


Bild 2.2 Absolutdruckskala und Überdruckskala

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_{abs} und dem aktuell vorliegenden (absoluten) **Atmosphärendruck** p_{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_{abs} größer als der Atmosphärendruck p_{amb} , nimmt der Überdruck positive Werte an:

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

Bei einem Absolutdruck p_{abs} , der kleiner als der Atmosphärendruck p_{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_{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_{amb} bestimmt wird.

In der Pneumatik wird meist nicht mit dem Absolutdruck p_{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.

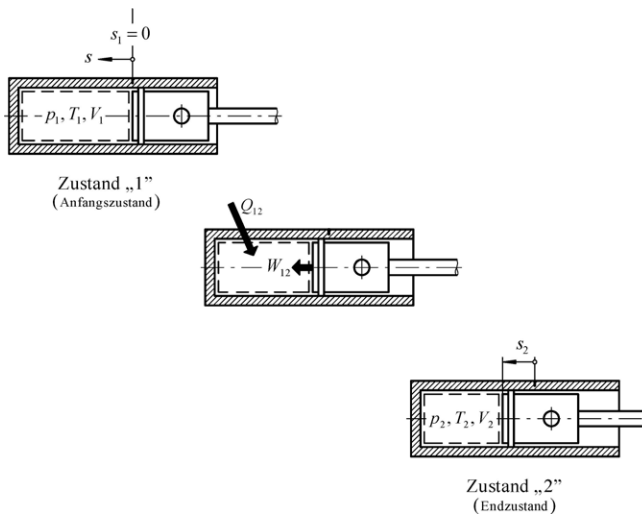


Bild 2.3 Geschlossenes thermodynamisches System (hier: Gas in einem Zylinder)

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“.

Hinweis: Die Größen Q_{12} und W_{12} werden auch Prozessgrößen genannt, deren Indizierung „12“ (gesprochen: „eins zwei“) darauf hinweist, dass diese Größen das System vom Zustand „1“ in den Zustand „2“ überführen.

Die während der Zustandsänderung von „1“ nach „2“ am System verrichtete mechanische Arbeit W_{12} dient hauptsächlich zur Änderung des Volumens von V_1 auf V_2 (Volumenänderungsarbeit W_{V12}). Ein geringer (vielfach vernachlässigbarer) Anteil von W_{12} wird durch Reibung (bei der Verschiebung des Kolbens im Gas erzeugte Wirbel) in Wärme umgesetzt. Dieser Anteil wird mit **Dissipationsarbeit** J_{12} bezeichnet. Somit ist

$$W_{12} = W_{V12} + J_{12} \quad (2.11)$$

Gl. (2.11) eingesetzt in Gl. (2.10) ergibt

$$Q_{12} + W_{V12} + J_{12} = U_2 - U_1 \quad (2.12)$$

Werden die Größen in Gl. (2.12) auf die sich im System befindende Masse m bezogen, lässt sich der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme wie folgt formulieren:

$$q_{12} + w_{V12} + j_{12} = u_2 - u_1 \quad (2.13)$$

mit $q_{12} = Q_{12} / m$, $w_{V12} = W_{V12} / m$, $j_{12} = J_{12} / m$, $u_1 = U_1 / m$ und $u_2 = U_2 / m$.

Hinweis: In der Thermodynamik werden die durch kleine und große Buchstaben bezeichneten Größen auch sprachlich unterschieden. So heißen z. B. U_1 innere Energie (Zustand „1“) und u_1 spezifische innere Energie (Zustand „1“). Auf derartige sprachliche Unterschiede soll hier verzichtet werden: U_1 und u_1 werden hier beide mit innerer Energie (Zustand „1“) bezeichnet, obwohl man sich über deren Unterschiede im Klaren sein muss.

Die Gleichung zur Berechnung der am Gas verrichteten Volumenänderungsarbeit lautet

$$W_{V12} = - \int_1^2 p \, dV \quad (2.14)$$

Bei einer Kompression wird am System Arbeit verrichtet und mit $dV < 0$ nimmt die Volumenänderungsarbeit einen positiven Wert an. Bei einer Expansion wird vom System Arbeit verrichtet und mit $dV > 0$ nimmt die Volumenänderungsarbeit einen negativen Wert an.

Mit $dv = dV/m$ und $w_{V12} = W_{V12}/m$ ergibt sich die Volumenänderungsarbeit zu

$$w_{V12} = - \int_1^2 p \, dv \quad (2.15)$$

und der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme erhält die Form

$$q_{12} - \int_1^2 p \, dv + j_{12} = u_2 - u_1 \quad (2.16)$$

Wird angenommen, dass das thermodynamische System (Gas im Zylinder) keinerlei Reibungseinflüssen unterliegt, dann ist die Dissipationsarbeit $j_{12} = 0$ und der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme lautet

$$q_{12} - \int_1^2 p \, dv = u_2 - u_1 \quad (2.17)$$

Der Betrag der Volumenänderungsarbeit entspricht der Fläche unter der Kurve im p - v -Diagramm (Bild 2.4).

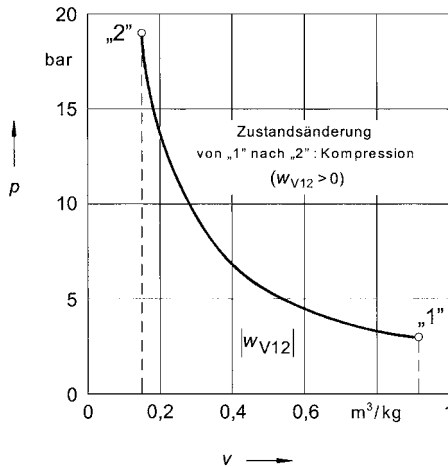


Bild 2.4 p - v -Diagramm mit Volumenänderungsarbeit $|w_{V12}|$ als Fläche unter der Kurve

Hinweis: Aufgabe 1 (Kapitel 13) verdeutlicht, wie sich bei Kenntnis der Fläche unter der p - v -Kurve die Volumenänderungsarbeit ermitteln lässt.

2.3.2 1. Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme

Über die Grenzen **offener Systeme** fließen neben Energieströmen auch Stoffströme, die mit Energie behaftet sind. Bild 2.5 zeigt als Beispiel für ein offenes System das sich in einem Zylinder befindende Gas, welches seitlich durch einen beweglichen Kolben gasdicht abgeschlossen ist. Hier hat im Unterschied zum geschlossenen System des Bildes 2.3 der Zylinderraum eine Öffnung, über die Gas aus- oder einströmen kann.

Während der Zustandsänderung des Gases vom Zustand „1“ in den Zustand „2“ sollen eine Masse Δm über die Öffnung dem System zugeführt, durch Verschiebung des Kolbens am System Arbeit verrichtet und dem System von außen Wärme zugeführt werden.

Dem System werden somit Q_{12} , W_{12} , $\Delta m \cdot u$, $\Delta m \cdot p \cdot v$ und $1/2 \Delta m \cdot c^2$ zugeführt. Dadurch ändert sich die innere Energie vom Zustand „1“ (U_1) zum Zustand „2“ (U_2).

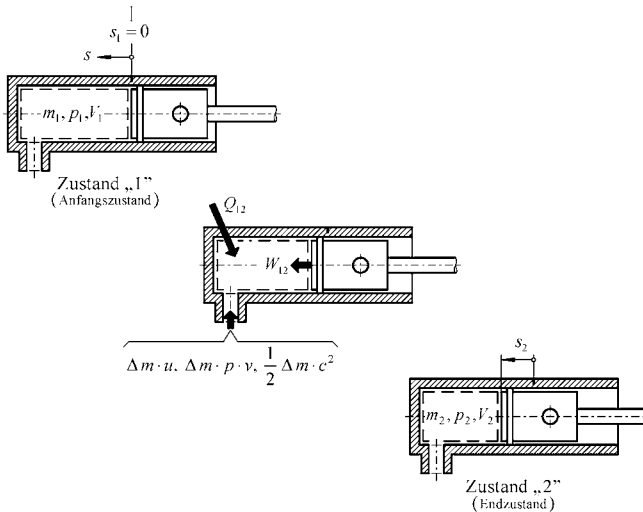


Bild 2.5 Offenes thermodynamisches System

Der 1. Hauptsatz für das in Bild 2.5 dargestellte offene System lautet

$$Q_{12} + W_{12} + \Delta m \cdot u + \Delta m \cdot p \cdot v + \frac{1}{2} \Delta m \cdot c^2 = U_2 - U_1 \quad (2.18)$$

Darin ist das Produkt $p \cdot v$ die **Verschiebearbeit**. Multipliziert mit der Masse Δm ergibt sich die zum Hineindrücken dieser Masse aufzubringende Arbeit. Mit $\Delta m \cdot u$ wird die der Masse Δm innewohnende Energie, also deren innere Energie, berücksichtigt. Weiterhin ist $1/2 \Delta m \cdot c^2$ die kinetische Energie der Masse Δm . Mit $h = p \cdot v + u$ nimmt Gl. (2.18) die Form

$$Q_{12} + W_{12} + \Delta m \left(h + \frac{1}{2} c^2 \right) = U_2 - U_1 \quad (2.19)$$

an. Die Größe h wird **Enthalpie** genannt.

Index

A

Abluftdrosselung 149, 152
Absolutdruck 18
Absolutdruckskala 19
absolute Feuchte 58
absolute Wandraufigkeit 56
Absperrhahn 136
Absperrventile 136
Adiabate 40
adiabate Zustandsänderung 40
Anlagen-Nummer 83
Anschlussbezeichnungen 123
Anschlüsse von Ventilen 87
Ansteuerung doppelwirkender Zylinder 146
Ansteuerung einfachwirkender Zylinder 143
Antoine-Gleichung 59
Atmosphärendruck 19
atmosphärische Druckdifferenz 19
Aufbereitung des Druckmediums 78f.
Ausflusscharakteristik 65
Ausflussfunktion 64
Ausgangsstellung 123

B

Balgzylinder 98
Bandzylinder 105
Bar 18
Bauteil-Nummer 84
Bauteilziffer 86
Betätigungseinrichtungen 71ff., 127

D

Dichtbandzylinder 106
Dichte 49
Differenzialzylinder 102
direkte Ansteuerung 144
Dissipationsarbeit 23
doppeltwirkende Zylinder 101
Drehkolbenverdichter 91
Drehzylinder 108
Drosselrückschlagventile 140, 148
Drosselventile 139
Druck 17
Druckbegrenzungsventile 136
Druckbereiche 20
Druckluft 15, 20
Druckluftaufbereitung 93
Druckluftherzeugung 88
Druckluftfilter 93
Druckluftmotoren 114
Druckluftöler 93
Druckregelventile 93, 137
Druckschaltventile 137, 157
Druckventile 136
Druckverluste 54
Durchfluss durch Düsen 63
Durchfluss durch pneumatische Komponenten 66
dynamische Viskosität 53

E

Eckart-Schwenkmotor 110
einfachwirkende Zylinder 95

einstellbares Drosselventil 148
einstufiger Kolbenverdichter 89
Ein- und Zweifaltenbalgzylinder 98
Endlagendämpfung 101
Energiesteuerung und -regelung 75 ff.
Energieumformung 74 f.
Enthalpie 25
Entlüftungsüberschneidung 124
Entropie 29, 43
entsperrbare Rückschlagventile 130
Entwicklung pneumatischer Systeme 142
Exzentrizität 119

F

feuchte Luft 58
Fluidtechnik 15

G

geschlossene Systeme 21
Geschwindigkeitsregulierung doppelt-wirkender Zylinder 150
Geschwindigkeitsregulierung einfach-wirkender Zylinder 148
Gesetz von Dalton 58
Gleichgangzylinder 103
Grundsaltungen 143
Grundsymbole 68 f.
Gruppenziffer 85

H

Hähne 122
1. Hauptsatz der Thermodynamik 63
1. Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme 21
1. Hauptsatz der Thermodynamik für offene stationäre Fließprozesse 26
1. Hauptsatz der Thermodynamik für Systeme 25
1. Hauptsatzes der Thermodynamik 22
Hektopascal 18

Hochdruckpneumatik 21
Hubkolbenverdichter 89

I

ideale Gase 32
ideales Verhalten 32
Impulsventil 128
Indikatordiagramm 90
indirekte Ansteuerung 145
Isentrope 43
isentropische Zustandsänderung 43
Isobare 36
isobare Zustandsänderung 36
Isochore 38
isochore Zustandsänderung 38
Isotherme 34
isotherme Zustandsänderung 34

K

Kennfelder 116
Kennzeichnungsschlüssel 84
kinematische Viskosität 53
Knicksicherheit 104
Knickungsdiagramm 104
Kolbenmotoren 114
Kolbenstange 101
kolbenstangenlose Zylinder 105
Kolbenstangenzyylinder 95
Kompaktzylinder 99
Kontinuitätsgleichung 51
kritisches Druckverhältnis 67
Kugelsitzventile 124
Kurzhub-Membranzylinder 96
Kurzhubzylinder 100

L

Lamellenmotoren 119
Lamellenverdichter 92
laminare Strömung 51
Längsflachschieberventil 125
Längsschieberventil 125
Leckverluste 124

Leitungen 70
 Leitungsverbindungen 70
 Luft 20
 Luftverbrauch 104
 Luftverbrauchsdiagramm 104

M

Magnetventil 128
 Magnetzylinder 105
 Maßeinheit 18
 Massenstrom 64
 Mehrstellungszyylinder 107
 Membranverdichter 91
 Millibar 18
 Mittelhub-Rollmembranzylinder 97
 mittlere Adiabatenexponent 40
 mittlere spezifische Wärmekapazitäten 33

N

Niederdruckpneumatik 21
 Normaldruckpneumatik 21
 Normatmosphäre 20
 Normdruck 49
 Normtemperatur 49
 Normvolumen 49
 Normvolumenstrom 50

O

ODER-Glied 133
 offene Systeme 25
 Öffnungsdruck 131

P

Pascal 18
 physikalischer Normzustand 50
 Pilotventil 129
 Plattenschieberventile 126
 Pneumatik 15
 pneumatische Anlage 16
 pneumatisches System 16
 pneumatische Steuerung 16

Polytrope 44
 Psi 18
 p-v-Diagramm 24, 35f., 39f., 45, 90

R

Radialkolben-Druckluftmotor 114
 Radialkolbenmotor 115, 118
 Realgasfaktor 31
 Regelvorgang 138
 Reinheitsklassen 94
 relative Feuchte 60
 relative Luftfeuchtigkeit 49
 Reynolds-Zahl 51
 Rohrabzweigung 57
 Rohrreibungszahl 54
 Rollmembranzylinder 96
 Rückschlagventile 130
 Ruhestellung 122

S

Sättigung 59
 Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes 59
 Schaltkreis-Nummer 83
 Schaltpläne 68
 Schaltpläne pneumatischer Systeme 81
 Schieber 122
 Schieberventile 123, 125
 Schlauchrollbalgzylinder 99
 Schlitzzylinder 105
 Schnellentlüftungsventile 135, 154
 Schwenkmotoren 109
 Seilzylinder 105
 Sitzventile 123
 Sonderzylinder 107
 Spannmodule 98
 Speicherung 74f.
 Sperrventile 130
 spezielle Gaskonstante 31
 spezifische Wärmekapazität 32
 stationärer Fließprozess 26
 Steueranschlüsse 123
 Steuerkette 142

Strömungsformen 51
Strömungsgeschwindigkeit 64
Strömungsverlust 54
Stromventile 139
Struktur von Schaltplänen 82
Symbole 68

T

Tandemzylinder 107
technische Arbeit 47
technischer Normzustand 50
Tellersitzventil 125
thermische Zustandsgleichung 31
thermische Zustandsgleichung idealer Gase 32
thermische Zustandsgleichung realer Gase 31
Thermodynamik 21
Turboverdichter 89
turbulente Strömung 51

U

Überdruck 18
überhitzter Wasserdampf 58
überkritischer Massenstrom 66
UND-Glied 134
Unterdruck 19

V

Ventile 122
Ventil-Symbole 122
Verdichterbauarten 88
Verschiebearbeit 25
Vielzellen-Rotationsverdichter 92

Vierstellungszyylinder 107
Viskosität 53
Volumenänderungsarbeit 47
Volumenstrom 50
vorgesteuerte Wegeventile 128

W

Wartungseinheit 93
Wasserbeladung 61
Wassergehalt 61
Wechselventile 133, 156
Wechselventil-ODER-Funktion 155
2/2-Wegeventil 123
3/2-Wegeventil 124
4/2-Wegeventil 125
4/3-Wegeventil 126
5/2-Wege-Impulsventil 125
Wegeventile 122
Widerstandszahl 57

Z

Zeitverzögerungsventile 140, 159
Ziffersystem 86
Zuluftdrosselung 148, 151
Zusatzausrüstung 79f.
Zustand 31
Zustandsänderung 22
Zustandsänderungen idealer Gase 34, 48
Zustandsgrößen 31
Zweidruckventile 134
Zweidruckventil-UND-Funktion 156
zweistufiger Kolbenverdichter 91
Zylinder 95
Zylinder mit beidseitiger Kolbenstange 103