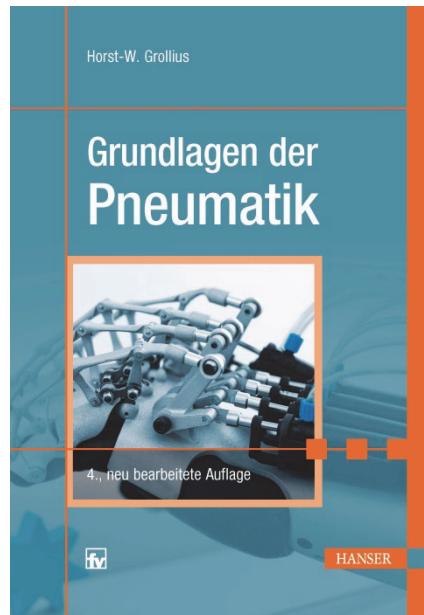


# HANSER



## Leseprobe

zu  
„**Grundlagen der Pneumatik**“  
von Horst-Walter Grollius

ISBN (Buch): 978-3-446-44636-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-45548-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44636-6>  
sowie im Buchhandel

# 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 ge normten 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>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>15</b>
<b>2 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 Polytrope 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>Drucklufterzeugung und Druckluftaufbereitung .....</b>	<b>88</b>
6.1	Drucklufterzeugung .....	88
6.2	Druckluftaufbereitung .....	93
<b>7</b>	<b>Zylinder .....</b>	<b>95</b>
7.1	Einfachwirkende Zylinder .....	95
7.1.1	Kolbenstangenzyliner .....	95
7.1.2	Membran- und Rollmembranzylinder .....	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>	114
9.1	Kolbenmotoren	114
9.2	Lamellenmotoren	119
<b>10</b>	<b>Ventile</b>	122
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	Betätigungsseinrichtungen	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>	142
<b>12</b>	<b>Grundschaltungen (Auswahl)</b>	143
12.1	Schaltungen zur Ansteuerung einfachwirkender Zylinder	143
12.2	Schaltungen zur Ansteuerung doppeltwirkender Zylinder	146
12.3	Schaltungen zur Geschwindigkeitsregulierung einfachwirkender Zylinder	148

12.4 Schaltungen zur Geschwindigkeitsregulierung doppeltwirkender 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 Aufgaben .....</b>	<b>161</b>
<b>■ Quellen und weiterführende Literatur .....</b>	<b>197</b>
<b>■ Anhang .....</b>	<b>199</b>
<b>■ Index .....</b>	<b>217</b>

**Hinweis:** Anstelle des Buchstabens Z kann auch jeder andere Buchstabe des Alphabets verwendet werden, außer den in obiger Liste enthaltenen Buchstaben.

Der Kennzeichnungsschlüssel wird abgeschlossen durch die **Bauteil-Nummer**, die mit 1 beginnend zugeordnet zu obiger Bauteil-Kennzeichnung jedes Bauteil des jeweiligen Schaltkreises fortlaufend nummeriert. Bild 5.4 zeigt den Zusammenhang der einzelnen Teile des Kennzeichnungsschlüssels der Bauteile nach *DIN ISO 1219-2*.

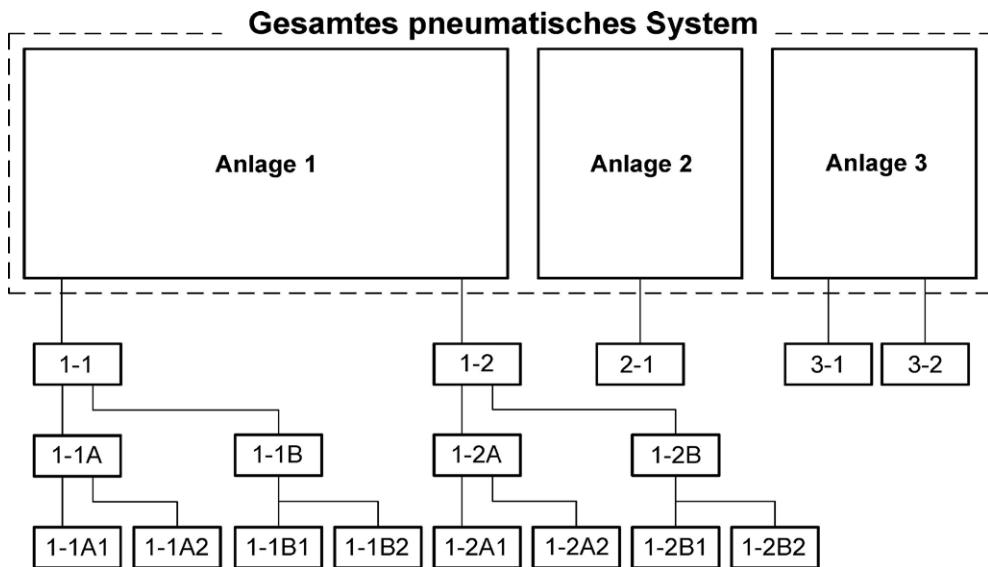
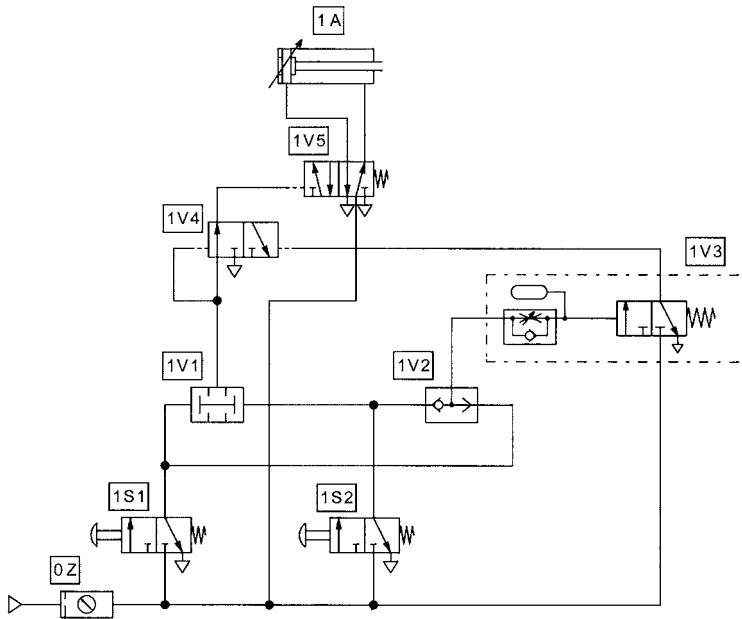


Bild 5.4 Kennzeichnungsschlüssel für Bauteile nach *DIN ISO 1219-2*

Gemäß Bild 5.4 besteht das gesamte pneumatische System aus drei Anlagen. Die Anlage 1 besteht aus zwei Schaltkreisen, die Anlage 2 hat nur einen Schaltkreis, während die Anlage 3 ebenfalls aus zwei Schaltkreisen besteht. Für die Bauteilkennzeichnung werden hier die Buchstaben A (für Antriebe) und B (für alle anderen Bauteile, außer den Bauteilen, die durch P, A, M, S, V gekennzeichnet werden) verwendet. Bild 5.5 zeigt als Beispiel einen Schaltkreis, dessen Bauteile entsprechend des Kennzeichnungsschlüssels nach *DIN ISO 1219-2* gekennzeichnet sind.

Erläuterungen zur Funktionsweise des Schaltplans: Werden die beiden mit Handtaster versehenen 3/2-Wegeventile 1S1 und 1S2 betätigt, gelangt Druckluft über das Zweidruckventil 1V1 und das 3/2-Wege-Impulsventil 1V4 zum pneumatisch betätigten 5/2-Wegeventil 1V5, das seine zweite Schaltstellung annimmt und diese Schaltstellung während des Anliegens der Druckluft beibehält. Es gelangt Druckluft auf die Kolbenseite des doppeltwirkenden Zylinders, dessen Kolbenstange bis zum Erreichen der vorderen Endlage auffährt und in dieser Lage verbleibt, bis über das Zeitverzögerungsventil 1V3 das Einfahren der Kolbenstange bewirkt wird, das wie folgt funktioniert: Durch das in zweiter Schaltstellung stehende 3/2-Wegeventil 1S2 erfolgt über das Wechselventil 1V2 ein Füllen des im

Zeitverzögerungsventil integrierten Speichers mit Druckluft. Die Zeit zum Füllen des Speichers ist mithilfe des Drosselvents einstellbar. Hat der Speicherdruck den Schaltdruck des im Zeitverzögerungsventil integrierten 3/2-Wegevents erreicht, nimmt dieses seine zweite Schaltstellung an. Es gelangt Druckluft zum 3/2-Wege-Impulsventil 1V4, das damit seine zweite Schaltstellung annimmt und das 5/2-Wegeventil 1V5 gelangt dadurch wieder in die Ausgangsstellung. Die auf die Kolbenstangenseite des doppeltwirkenden Zylinders einwirkende Druckluft fährt dessen Kolbenstange bis zum Erreichen der hinteren Endlage ein.



**Bild 5.5** Beispiel für die Anwendung des Kennzeichnungsschlüssels nach DIN ISO 1219-2 auf ein pneumatisches System

In der industriellen Praxis finden sich auch Schaltpläne, in denen die Bauteile allein durch Ziffern gekennzeichnet sind. Die Bauteile werden durch eine Gruppen- und eine Bauteile-Nummer gekennzeichnet. So bedeutet beispielsweise die Kennzeichnung 3.6, dass es sich um die 3. Gruppe und das 6. Bauteil dieser Gruppe handelt.

Zur Kennzeichnung der **Gruppen** werden folgende Ziffern verwendet:

#### Gruppenziffer 0:

Alle Bauteile der Energieversorgung werden in einer Gruppe mit der Gruppenziffer 0 zusammengefasst.

#### Gruppenziffern 1, 3, 5, ...

Bei der Unterteilung eines Schaltplans in Gruppen (z. B. nach der Anzahl der Steuerketten) werden die einzelnen Gruppen durch ungerade Gruppenziffern gekennzeichnet.

Zur Kennzeichnung der **Bauteile** werden folgende Bauteilziffern verwendet:

### **Bauteilziffern .2, .4, .6, ...**

Gerade Bauteilziffern werden verwendet für die Bauteile, die den **Vorlauf** des jeweiligen Arbeitselementes beeinflussen.

### **Bauteilziffern .3, .5, .7, ...**

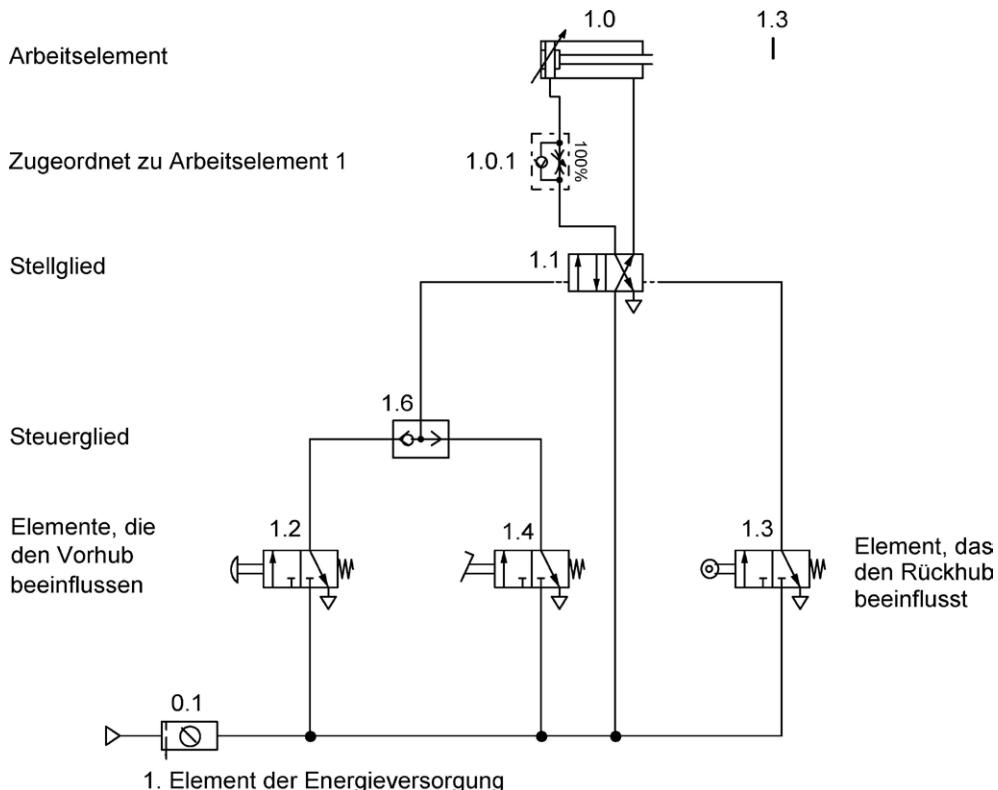
Ungerade Bauteilziffern werden verwendet für die Bauteile, die den **Rücklauf** des jeweiligen Arbeitselementes beeinflussen.

### **Bauteilziffer .1**

Die Bauteilziffer .1 ist dem Stellglied vorbehalten. So bedeutet beispielsweise die Kennzeichnung 2.1, dass es sich um das Stellglied der 2. Gruppe handelt.

### **Bauteilziffern .0.1, .0.2, .0.3, ...**

Sind Bauteile vorhanden, die zwischen Stellglied und Arbeitselement liegen (z.B. Drosselventile), so erfolgt deren Kennzeichnung durch .0.1, .0.2, .0.3, ... Bild 5.6 zeigt einen Schaltplan, dessen Bauteile nach diesem Ziffersystem gekennzeichnet sind.



**Bild 5.6** Schaltplan mit Kennzeichnung der Elemente durch Ziffersystem

Die Kennzeichnung der Anschlüsse von Ventilen erfolgt nach *DIN ISO 5599* durch Ziffern. Ältere Schaltpläne weisen noch Kennzeichnungen der Anschlüsse mittels Buchstaben auf. In Tabelle 5.1 wird für einige Wegeventilarten die Kennzeichnung mittels Ziffern im Vergleich mit der Kennzeichnung durch Buchstaben vorgestellt.

**Tabelle 5.1** Kennzeichnung der Anschlüsse von Ventilen

Anschluss	alte Norm	Kennzeichnung nach DIN ISO 5599		
		für 2/2 Wegeventil handbetätigt	für 3/2 Wegeventil pneumatisch betätigt	für 5/2 Wegeventil pneumatisch betätigt
Druckluftversorgung	P	1	1	1
Arbeitsleitung	A	2	2	4
Arbeitsleitung	B	-	-	2
Entlüftung	R	3	3	5
Entlüftung	S	-	-	3
Steueranschluss	Z	-	-	14
Steueranschluss	Y	-	12	12

**Hinweis:** In den nachfolgend gezeigten Schaltplänen sind die Bauteile nach *DIN ISO 1219-2* und die Anschlüsse nach *DIN ISO 5599* gekennzeichnet; eine Kennzeichnung mittels Buchstaben ist nicht zu finden.

# 6

## Drucklufterzeugung und Druckluftaufbereitung

### ■ 6.1 Drucklufterzeugung

Die zum Betrieb pneumatischer Systeme benötigte Druckluft wird in Verdichtern (Kompressoren) erzeugt, die von Elektro- oder Verbrennungsmotoren angetrieben werden. Zum Einsatz können Hubkolben-, Drehkolben- oder Strömungsverdichter (Turboverdichter) kommen. Welche Bauart zur Anwendung gelangt, hängt im Wesentlichen vom benötigten Druck und dem geforderten Volumenstrom, in der Pneumatik Liefermenge genannt, ab. Das Diagramm des Bildes 6.1 veranschaulicht die Einsatzbereiche der in Frage kommenden Verdichterbauarten.

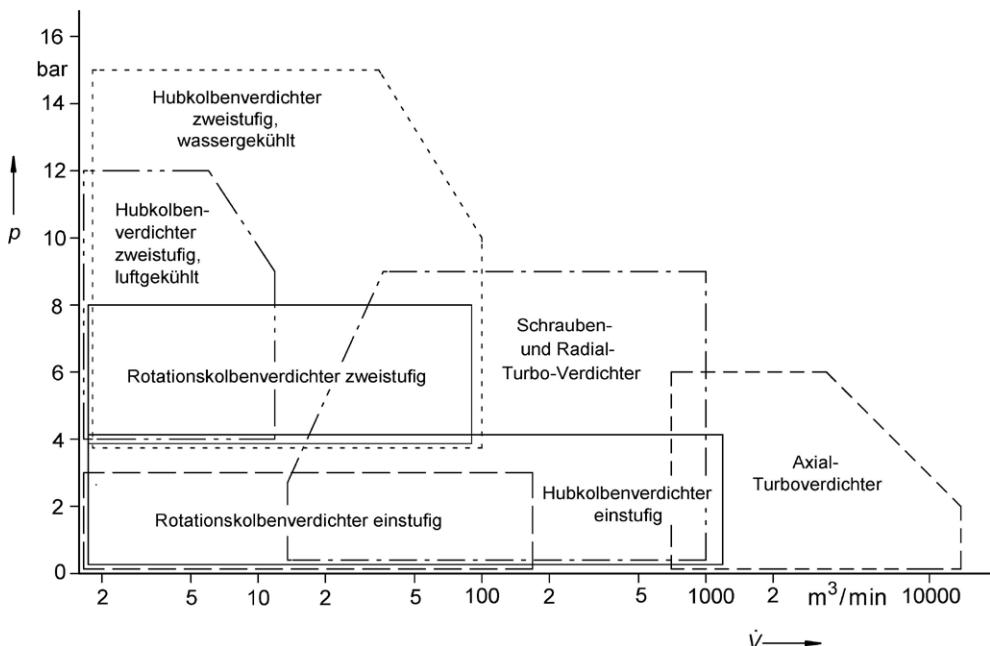


Bild 6.1 Einsatzbereiche der Verdichterbauarten

Zur Bestimmung der Liefermenge  $\dot{V}_1$  eines Verdichters wird der druckseitig vorhandene Volumenstrom  $\dot{V}_2$  auf den Ansaugzustand umgerechnet. Es ist

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \frac{T_1 \cdot p_2}{T_2 \cdot p_1} \quad (6.1)$$

Neben benötigtem Druck und geforderter Liefermenge sind für die Auswahl eines Verdichters auch Aspekte wie Raumbedarf, Energieverbrauch, Pulsation des Volumenstroms, Ölfreiheit und Wartungsaufwand mit in die Überlegungen einzubeziehen.

Turboverdichter kommen insbesondere dann zur Anwendung, wenn hohe Liefermengen ( $\dot{V}_1 > 600 \text{ m}^3/\text{min}$ ) gefordert werden. Die in der Industriepneumatik verlangten Liefermengen liegen meist darunter, sodass hier verstärkt Hub- und Drehkolbenverdichter, die nach dem Verdrängungsprinzip arbeiten, zum Einsatz gelangen.

Zur Gruppe der Hubkolbenverdichter gehören die ein- und mehrstufigen Kolbenverdichter und die Membranverdichter. Der einstufige Kolbenverdichter (Bild 6.2) saugt bei der Abwärtsbewegung des Kolbens (1) über das geöffnete Einlassventil (2) atmosphärische Luft an; das Auslassventil (3) ist dabei geschlossen. Bei der Aufwärtsbewegung des Kolbens wird die Luft verdichtet und über das geöffnete Auslassventil (bei geschlossenem Einlassventil) der Druckleitung zugeführt. Dieser Vorgang wiederholt sich nach jeder Umdrehung der Kurbelwelle (4). Der durch den Kompressionsvorgang verursachte Anstieg der Lufttemperatur wird durch am Zylinderkopf angebrachte Kühlrippen (5) (meist Luftkühlung) niedrig gehalten.

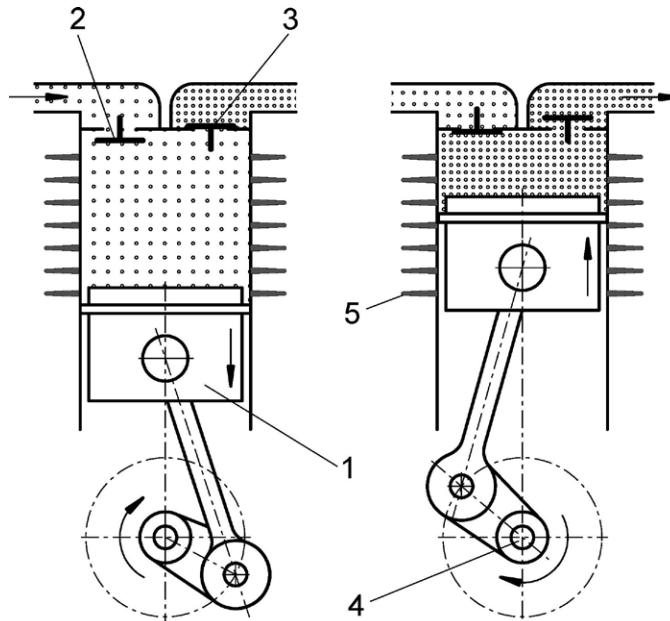


Bild 6.2 Einstufiger Kolbenverdichter – Prinzip (links: Ansaugvorgang, rechts: Kompressionsvorgang)

In Bild 6.3 ist das  $p$ - $v$ -Diagramm des einstufigen Kolbenverdichters qualitativ dargestellt, das auch als Indikatordiagramm bezeichnet wird.

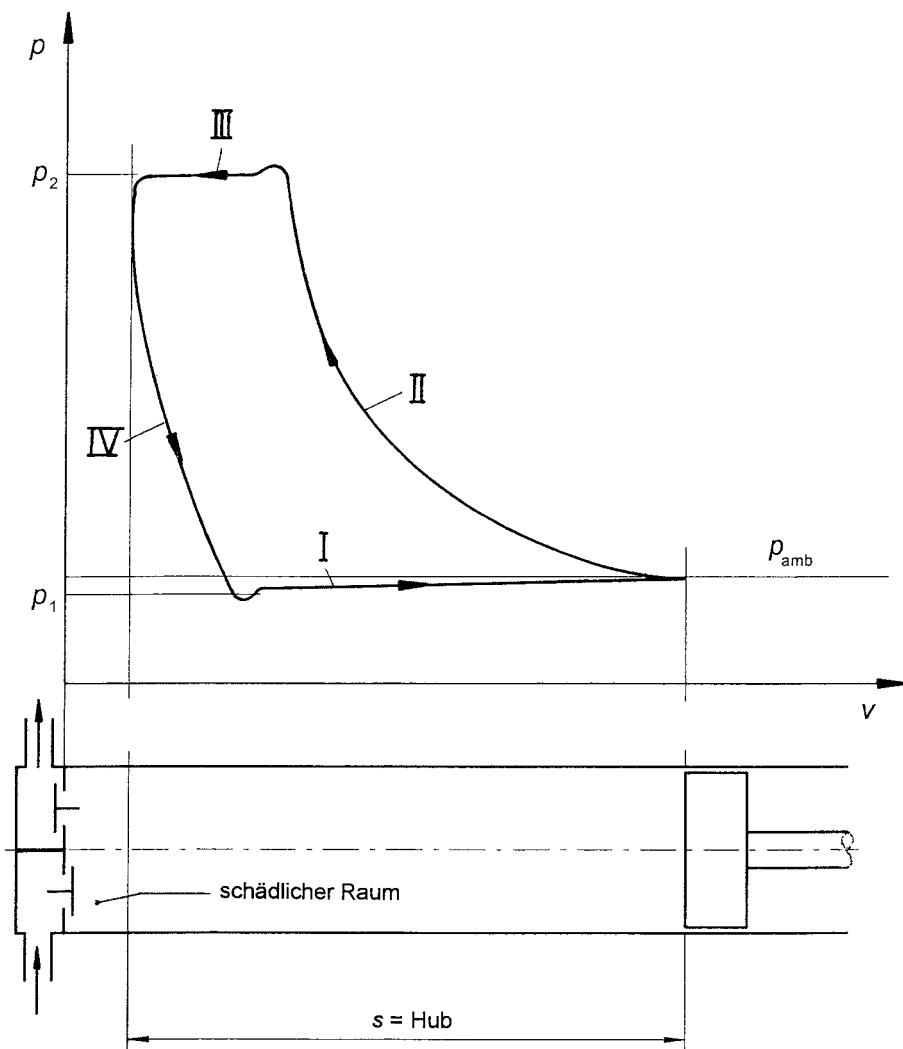
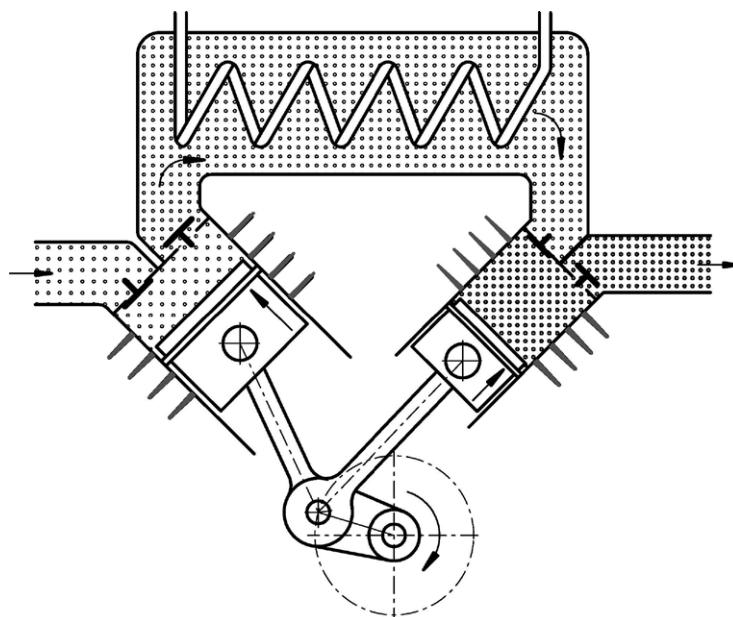


Bild 6.3  $p$ - $v$ -Diagramm (Indikatordiagramm) des einstufigen Kolbenverdichters (qualitativ)

Das Indikatordiagramm zeigt mit I die Ansauglinie, die infolge von Druckverlusten in den Ansaugleitungen und Ventilen etwas unterhalb des Atmosphärendrucks  $p_{amb}$  verläuft, mit II die Kompressionslinie, mit III die Ausschublinie, die wegen der zu überwindenden Leitungswiderstände über dem Druck des Leitungsnetzes liegt und mit IV die Rückexpansionslinie. Diese zeigt den Verlauf der Expansion der im „schädlichen Raum“ befindlichen Luft auf den Druck der Ansauglinie I.

Bild 6.4 zeigt als Beispiel für einen mehrstufigen Kolbenverdichter die Prinzipdarstellung eines zweistufigen Kolbenverdichters. Die im linken Zylinder komprimierte und dabei erwärmte Luft wird einen Zwischenkühler zugeführt, der die Luft vor Eintritt in den rechten Zylinder abkühlt, in dem die weitere Verdichtung der Luft erfolgt. Die mit der Abkühlung verbundene Volumenverkleinerung bewirkt eine Ersparnis an Antriebsleistung gegenüber einem ohne Zwischenkühlung ausgeführten Verdichter.

Die Zwischenkühlung ist auch deshalb erforderlich, da ohne diese der durch die Kompressionsvorgänge verursachte große Temperaturanstieg zu kaum beherrschbaren Problemen führt.



**Bild 6.4** Zweistufiger Kolbenverdichter mit Zwischenkühlung – Prinzip

Bei einem Membranverdichter (Bild 6.5) trennt eine Gummimembrane (1) die zu verdichtende Luft vom Zylinderraum (2). Der Kolben (3) ist mit der Gummimembrane verbunden, sodass diese die Auf- und Abwärtsbewegung des Kolbens zwangsweise mitmachen muss. Da die Luft von den Teilen des Zylinderraumes über die Gummimembrane vollkommen getrennt ist, kann kein Öl (benötigt zur Schmierung aufeinander gleitender Teile) in die Luft gelangen. Der Einsatz dieser Verdichterbauart bietet sich deshalb besonders in der Lebensmittel- und pharmazeutischen Industrie an.

Die oben vorgestellten Verdichterbauarten führen die Druckluft mit zeitlichen Unterbrechungen der Druckleitung zu (intermittierende Arbeitsweise).

Die zur Gruppe der Drehkolbenverdichter gehörenden Rotationsverdichter, Schraubenverdichter und Rootsverdichter liefern einen nahezu kontinuierlichen Druckluftstrom.

# 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 doppeltwirkender 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  
Betätigungsseinrichtungen 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  
Drucklufterzeugung 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 Zweifaltenbalgzyylinder 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  
 Gleichgangzyylinder 103  
 Grundschatungen 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  
 isentrope 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  
 Kolbenstangenzylinder 95  
 Kompaktzyylinder 99  
 Kontinuitätsgleichung 51  
 kritisches Druckverhältnis 67  
 Kugelsitzventile 124  
 Kurzhub-Membranzylinder 96  
 Kurzhubzyylinder 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  
 Mehrstellungszylinder 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

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

**R**

Radialkolben-Druckluftmotor 114  
 Radialkolbenmotor 115, 118  
 Realgasfaktor 31  
 Regelvorgang 138  
 Reinheitsklassen 94  
 relative Feuchte 60  
 relative Luftfeuchtigkeit 49  
 Reynolds-Zahl 51  
 Rohrabweigung 57  
 Rohreibungszahl 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 74 f.  
 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  
Ziffernsystem 86  
Zuluftdrosselung 148, 151  
Zusatzausrüstung 79 f.  
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