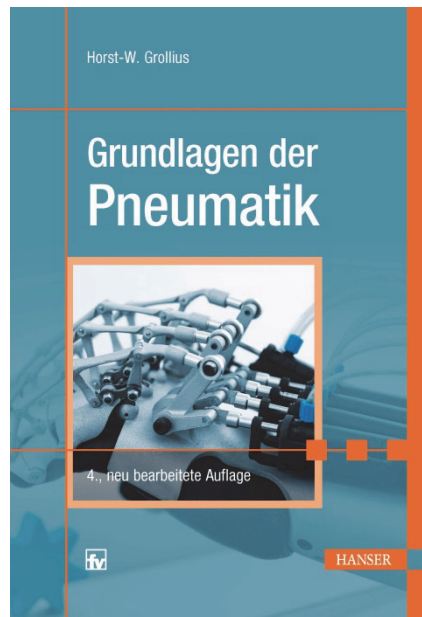


HANSER



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

© Carl Hanser Verlag, München

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

■	Vorwort	5
■	Formelzeichen	11
1	Einleitung	15
2	Basiswissen	17
	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
3	Durchfluss durch Düsen und pneumatische Komponenten	63
3.1	Durchfluss durch Düsen	63
3.2	Durchfluss durch pneumatische Komponenten	66
4	Genormte Symbole	68
5	Grundsätzliche Struktur von Schaltplänen pneumatischer Systeme, Kennzeichnungen	81
6	Druckluftherzeugung und Druckluftaufbereitung	88
6.1	Druckluftherzeugung	88
6.2	Druckluftaufbereitung	93
7	Zylinder	95
7.1	Einfachwirkende Zylinder	95
7.1.1	Kolbenstangenzylinder	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
8	Schwenkmotoren	109
8.1	Drehmomente bis 78 Nm	109
8.2	Drehmomente bis 260 Nm	112

9	Druckluftmotoren	114
9.1	Kolbenmotoren	114
9.2	Lamellenmotoren	119
10	Ventile	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	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
11	Hinweise zur Entwicklung pneumatischer Systeme	142
12	Grundsaltungen (Auswahl)	143
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
13	Aufgaben	161
■	Quellen und weiterführende Literatur	197
■	Anhang	199
■	Index	217

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*.

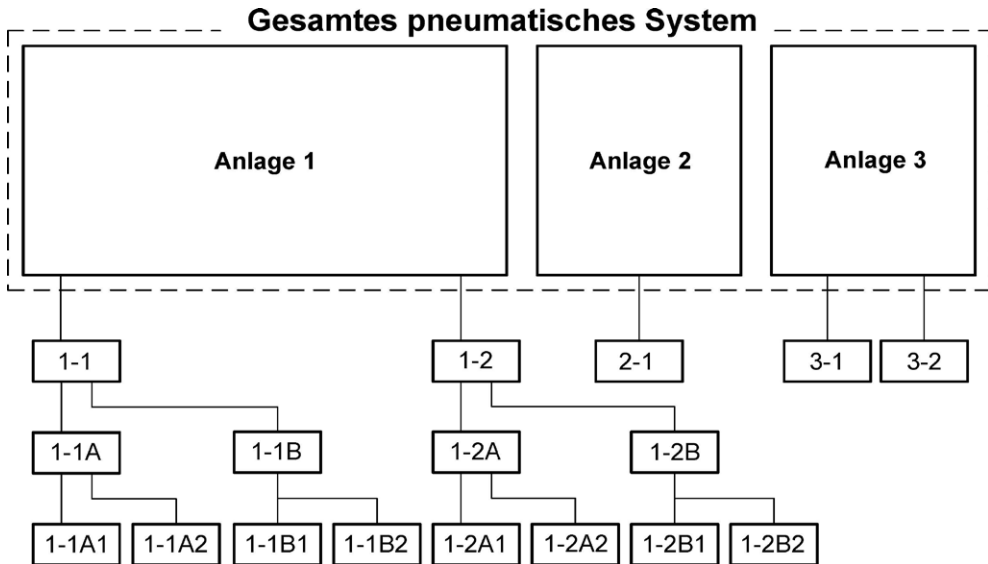


Bild 5.4 Kennzeichnungsschlüssel für Bauteile nach *DIN ISO 1219-2*

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 ausfährt 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 Drosselventils einstellbar. Hat der Speicherdruck den Schaltdruck des im Zeitverzögerungsventil integrierten 3/2-Wegeventils 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.

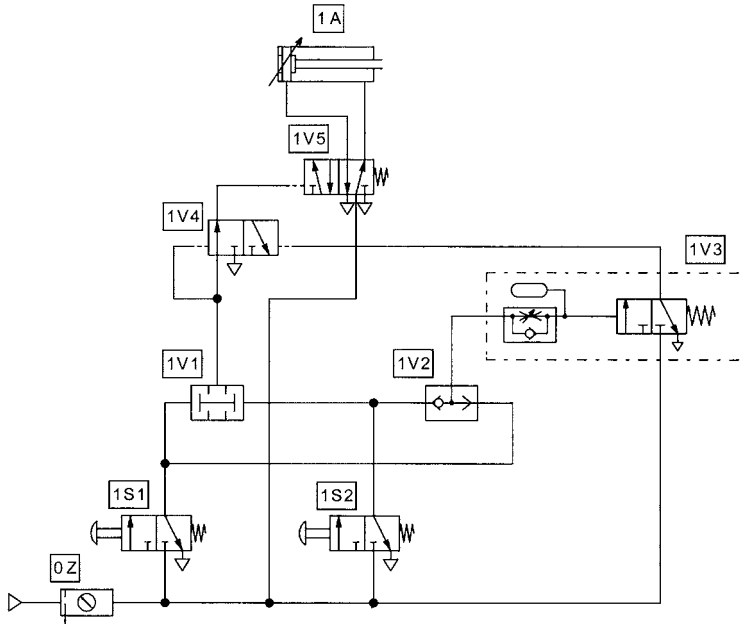


Bild 5.5 Beispiel für die Anwendung des Kennzeichnungsschlüssels nach *DIN ISO 1219-2* auf ein pneumatisches System

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 Bauteilnummer 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 Ziffernsystem gekennzeichnet sind.

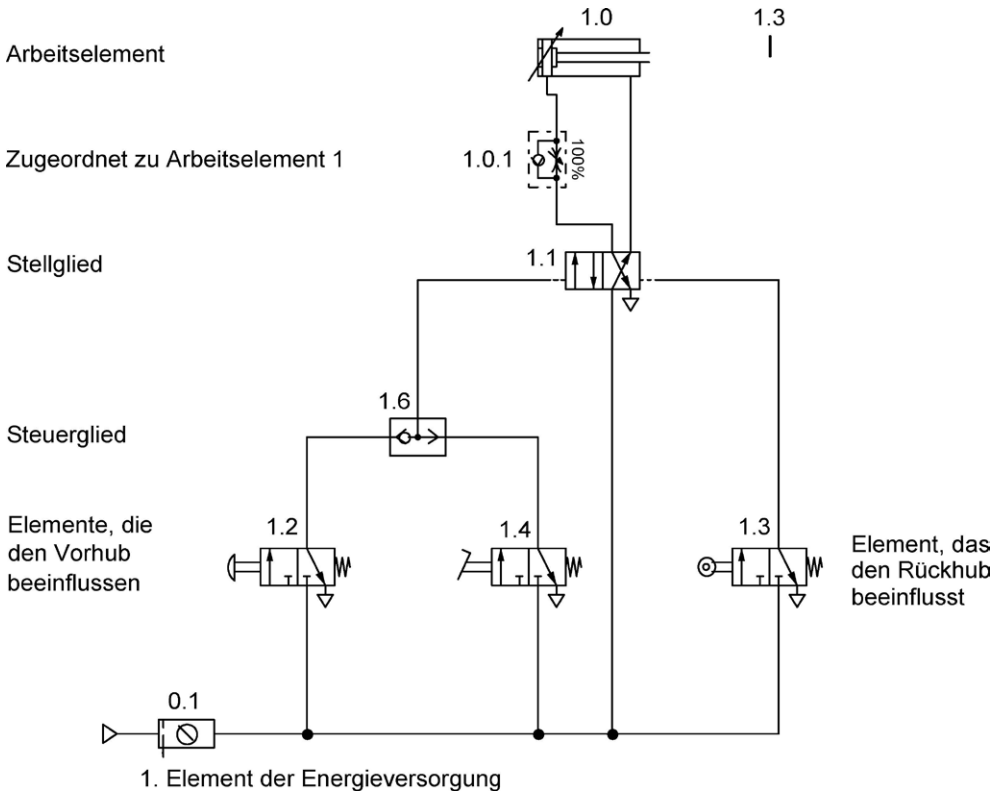


Bild 5.6 Schaltplan mit Kennzeichnung der Elemente durch Ziffernsystem

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.

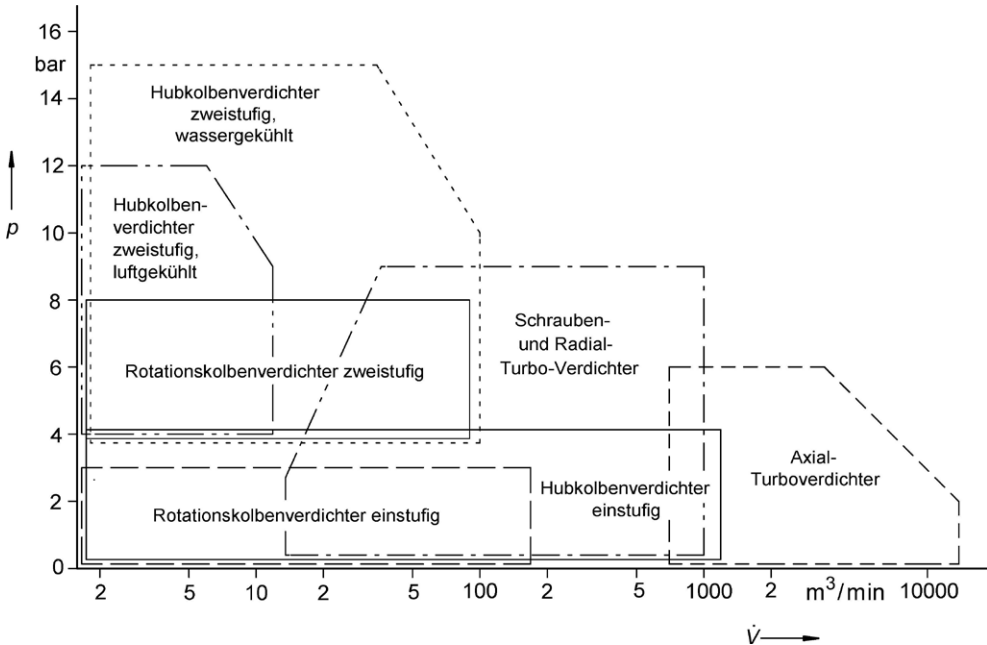


Bild 6.1 Einsatzbereiche der Verdichterbauarten

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.

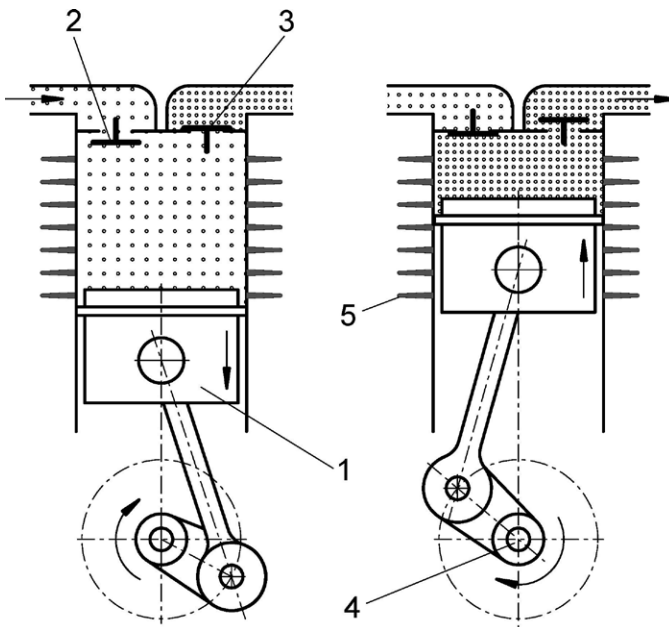


Bild 6.2 Einstufiger Kolbenverdichter – Prinzip (links: Ansaugvorgang, rechts: Kompressionsvorgang)

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

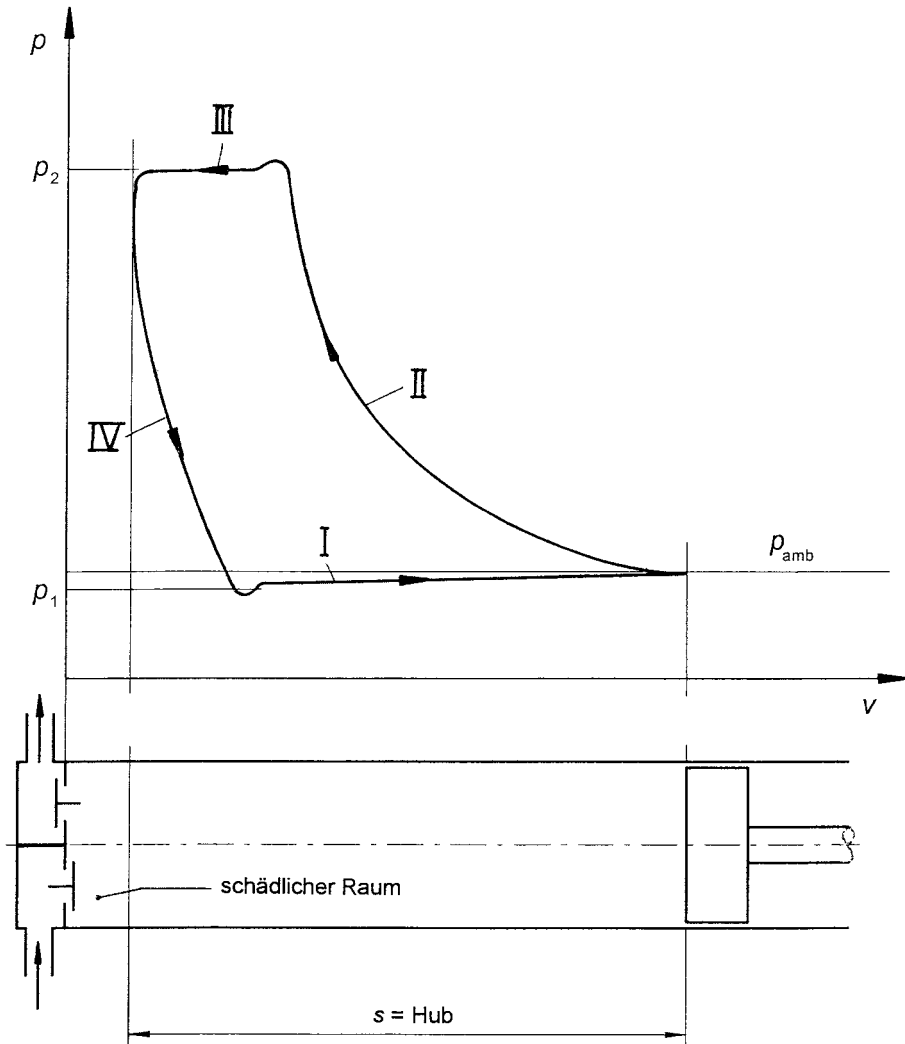


Bild 6.3 p - v -Diagramm (Indikatordiagramm) des einstufigen Kolbenverdichters (qualitativ)

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.

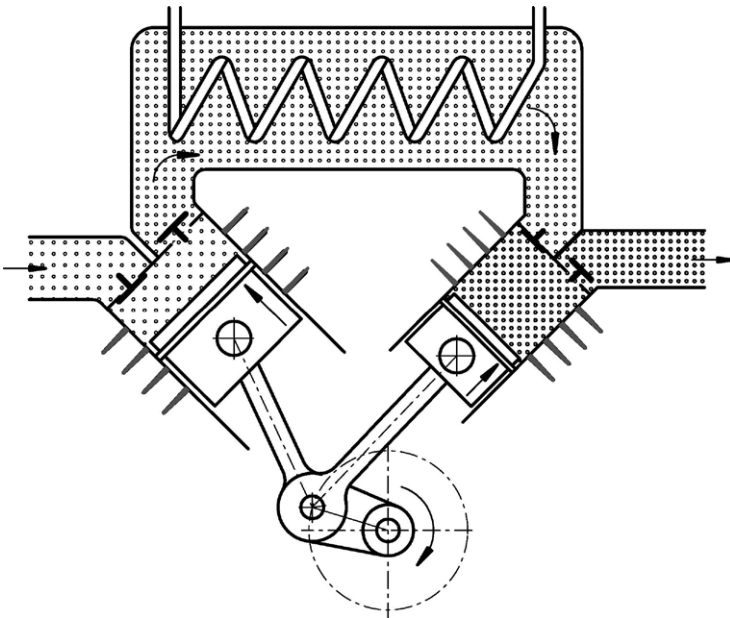


Bild 6.4 Zweistufiger Kolbenverdichter mit Zwischenkühlung – Prinzip

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 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