

## Inhalt

1	Allgemeines.....	1
1.1	Definition des Sachgebiets .....	1
1.2	Geschichtlicher Überblick .....	2
1.3	Pneumatik in der Gegenwart.....	5
1.4	Grundbegriffe.....	6
1.4.1	Druck.....	6
1.4.2	Temperatur .....	7
1.4.3	Volumenstrom.....	7
1.4.4	Normzustand .....	8
2	Theoretische Grundlagen .....	10
2.1	Zustandsgleichungen .....	10
2.1.1	Ideale Gase.....	11
2.1.2	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase .....	11
2.1.3	Kalorische Zustandsgleichungen.....	12
2.1.3.1	Innere Energie $U$ .....	12
2.1.3.2	Enthalpie $H$ .....	13
2.1.3.3	Isentropenexponent, spezifische Wärmekapazitäten und Gaskonstante.....	14
2.1.4	Reale Gase.....	15
2.2	Der erste Hauptsatz.....	16
2.2.1	Der erste Hauptsatz für ein geschlossenes System.....	17
2.2.2	Der erste Hauptsatz für ein offenes System.....	19
2.3	Zustandsänderungen .....	22
2.3.1	Isotherme Zustandsänderung .....	22
2.3.2	Isochore Zustandsänderung .....	23
2.3.3	Isobare Zustandsänderung .....	23
2.3.4	Isentrope Zustandsänderung .....	23
2.3.5	Polytrope Zustandsänderung.....	24
2.4	Berechnung der technischen Arbeit.....	24

---

2.4.1	Geschlossenes System.....	25
2.4.2	Technische Arbeit bei einem stationären Fließprozess .....	28
2.5	Eigenschaften des Druckmediums Luft.....	31
2.5.1	Zusammensetzung.....	31
2.5.2	Kompressibilität .....	32
2.5.2.1	Federsteifigkeit und Elastizitätsmodul .....	32
2.5.2.2	Energiespeicherfähigkeit .....	35
2.5.3	Viskosität.....	36
2.5.3.1	Dynamische Viskosität .....	36
2.5.3.2	Kinematische Viskosität .....	37
2.5.4	Luftfeuchtigkeit.....	38
2.5.5	Eigenschaften bei der technischen Anwendung .....	42
2.5.6	Stoffwerte .....	43
2.6	Durchflussgesetze .....	45
2.6.1	Durchfluss durch ideale Düsen .....	45
2.6.2	Durchfluss durch Blenden .....	50
2.6.3	Spaltströmungen.....	52
2.6.4	Ventile und Drosseln.....	55
2.6.4.1	Ellipsennäherung für Ausflussfunktion.....	57
2.6.4.2	Messung der Kennwerte Leitwert $C$ und kritisches Druckverhältnis $b$ .....	59
2.6.4.3	Beschreibung des Durchflusses mit Hilfe alternativer Kennwerte .....	60
2.6.5	Reihenschaltung pneumatischer Widerstände .....	62
2.6.6	Druckverluste in Rohrleitungen.....	67
3	Komponenten .....	68
3.1	Verdichter.....	68
3.1.1	Verdichter nach dem Verdrängungsprinzip.....	73
3.1.1.1	Technische Arbeit beim Kompressionsvorgang.....	73
3.1.1.2	Kolbenverdichter .....	76

3.1.1.3	Rotationsverdichter.....	79
3.1.2	Dynamische Verdichter.....	86
3.1.3	Leistungsbereiche der unterschiedlichen Verdichterbauarten .....	88
3.1.4	Fördervolumenstromregelung für Verdichter.....	89
3.1.4.1	Interne Regelung.....	89
3.1.4.2	Übergeordnete Regelung .....	93
3.2	Antriebe.....	95
3.2.1	Linearantriebe .....	96
3.2.1.1	Bauarten und konstruktive Ausführung von Pneumatikzylindern .....	97
3.2.1.2	Antriebsverhalten von Linearantrieben .....	116
3.2.1.3	Geschwindigkeitsverläufe von Zylinderantrieben bei getrennter Zu- und Abluftdrosselung .....	126
3.2.1.4	Hydropneumatischer Vorschubantrieb.....	130
3.2.2	Rotationsantriebe / Druckluftmotoren .....	131
3.2.2.1	Bauarten und konstruktive Ausführung von Rotationsantrieben .....	132
3.2.2.2	Antriebsverhalten von Rotationsantrieben.....	138
3.2.2.3	Überblick über die Kenndaten von verdrängenden Rotationsmotoren.....	140
3.2.2.4	Drehzahlregelung.....	141
3.2.2.5	Vereisung der Abluftöffnungen von Rotationsantrieben .....	143
3.2.3	Schwenkantriebe .....	145
3.3	Ventile.....	150
3.3.1	Bauarten von Ventilen .....	151
3.3.1.1	Sitzventile .....	152
3.3.1.2	Schieberventile.....	154
3.3.2	Betätigungsarten von Ventilen .....	156
3.3.2.1	Mechanische Betätigung.....	157
3.3.2.2	Pneumatische Betätigung.....	159
3.3.2.3	Elektromechanische Betätigung .....	160

3.3.3	Vorgesteuerte Ventile .....	169
3.3.4	Funktion von Ventilen .....	173
3.3.4.1	Wegeventile .....	173
3.3.4.2	Sperrventile.....	177
3.3.4.3	Druckventile.....	182
3.3.4.4	Stromventile.....	186
3.3.4.5	Gruppierung von Ventilen.....	189
3.4	Druckluftaufbereitung.....	196
3.4.1	Trockner .....	199
3.4.2	Wartungseinheit .....	201
3.4.2.1	Filter und Kondensatabscheider .....	202
3.4.2.2	Druckregelventil .....	204
3.4.2.3	Öler.....	204
3.5	Sonstige Komponenten .....	208
3.5.1	Vakuumtechnik .....	208
3.5.1.1	Vakuumerzeugung.....	209
3.5.1.2	Anwendungen .....	210
3.5.2	Druckbehälter.....	212
3.5.2.1	Berechnung der Behältergröße .....	213
3.5.2.2	Gesetzliche Vorschriften für Druckbehälter.....	214
3.5.3	Leitungen und Verbindungen .....	215
3.5.4	Dichtungen .....	219
4	Steuerung und Regelung pneumatischer Systeme.....	221
4.1	Steuerung .....	222
4.1.1	Grundlagen.....	223
4.1.1.1	Logische Grundfunktionen .....	223
4.1.1.2	Ventilbetätigungen.....	224
4.1.1.3	Zylindergrundsaltungen.....	224
4.1.1.4	Lageplan.....	226
4.1.1.5	Funktionsplan.....	227

---

4.1.1.6	Schaltplan.....	229
4.1.2	Pneumatische Steuerungen .....	230
4.1.2.1	Willensabhängige Folgesteuerungen.....	230
4.1.2.2	Wegabhängige Folgesteuerungen.....	231
4.1.2.3	Zeitabhängige Folgesteuerungen.....	232
4.1.2.4	Druckabhängige Folgesteuerungen .....	233
4.1.2.5	Kombinierte Folgesteuerungen.....	234
4.1.2.6	Taktkettensteuerung.....	235
4.1.2.7	Programmschaltwerksteuerungen.....	238
4.1.3	Elektropneumatische Steuerungen.....	238
4.1.4	Sensoren .....	239
4.1.4.1	Näherungssensoren .....	239
4.1.4.2	Zeitschalter.....	248
4.1.4.3	Druckschalter .....	249
4.1.5	Steuerungseinheit.....	251
4.1.5.1	Verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS).....	251
4.1.5.2	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS).....	251
4.1.5.3	Industrie-PC (IPC).....	252
4.1.6	Kommunikation.....	253
4.1.6.1	Verdrahtungs- und Anschlusstechnik.....	253
4.1.6.2	Feldbussysteme .....	255
4.2	Regelung .....	263
4.2.1	Stetige Regelung .....	265
4.2.1.1	Proportionalventil.....	266
4.2.1.2	Positioniersysteme .....	268
4.2.1.3	Servopneumatische Mengenregelung.....	273
4.2.1.4	Elektropneumatische Druckregelung .....	275
4.2.2	Unstetige Ansteuerungsverfahren.....	276
4.2.2.1	Asynchrone Ansteuerung.....	276
4.2.2.2	Pulsmodulationsverfahren .....	277

---

4.2.2.3	Positionsregelung mit pulsweitenmodulierten Schaltventilen.....	280
5	Simulation .....	281
5.1	Systemsimulation .....	281
5.1.1	Grundlagen der pneumatischen Systemsimulation.....	283
5.1.1.1	Berechnung des Druckaufbaus .....	283
5.1.1.2	Berechnung der Temperaturänderung .....	284
5.1.2	Simulationsbeispiele .....	284
5.1.2.1	Be- und Entlüften eines Behälters .....	284
5.1.2.2	Zylinder im Lageregelkreis.....	286
5.1.2.3	Druckregelung mit einem Servoventil.....	288
5.2	Strömungssimulation .....	292
5.3	Komponentensimulation .....	294
6	Anwendungen .....	295
6.1	Automatisierungstechnik / Handhabungstechnik.....	295
6.1.1	Achsen.....	295
6.1.2	Greifer .....	297
6.2	Mobilpneumatik.....	300
6.2.1	Pneumatik in Kraftfahrzeugen .....	300
6.2.2	Pneumatik in Schienenfahrzeugen.....	302
6.3	Handwerkzeuge.....	304
6.4	Medizintechnik .....	309
7	Anhang .....	311
7.1	Literaturverzeichnis .....	311
7.2	Umrechnungsfaktoren.....	318
7.3	Schaltzeichen .....	320
7.4	Index.....	329