

# Kolbenmaschinen

Von Dipl.-Ing. Karl-Heinz Küttner  
Professor an der Technischen Fachhochschule Berlin

6., neubearbeitete und erweiterte Auflage  
Mit 346 Bildern, 28 Tafeln und 43 Beispielen



**B.G. Teubner Stuttgart 1993**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Küttner, Karl-Heinz:**

Kolbenmaschinen: mit 43 Beispielen / von Karl-Heinz  
Küttner. – 6., neubearb. und erw. Aufl. – Stuttgart: Teubner,  
1993

ISBN 978-3-519-06344-5      ISBN 978-3-322-94040-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-94040-7

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B.G. Teubner, Stuttgart 1993

Satz: Schreibdienst Henning Heinze, Nürnberg

Umschlaggestaltung: W. Koch, Sindelfingen

## Vorwort zur 6. Auflage

In den 25 Jahren nach dem Erscheinen der ersten Auflage hat bei den Kolbenmaschinen eine rasante Entwicklung stattgefunden, deren Ende noch nicht abzusehen ist. So wurden Berechnungs- und Herstellungsverfahren verfeinert und der Energiebedarf reduziert. Es war schon damals für ihr Verständnis ein umfangreiches Wissen auf den Gebieten der Physik und Chemie, der Maschinenteile und der Fertigungstechnik erforderlich. Hinzu kommen aber immer neue Fachgebiete wie die Tribologie, die Sicherheits-, Konstruktions-, Feinwerk- und Umwelttechnik und die enormen Fortschritte bei der Elektronik und den Computern.

Der kompakte Aufbau der Elektronik ermöglicht heute Steuerungen und Regelungen als Mikrosysteme mit den kleinsten Abmessungen. Externe Programmierverfahren passen Schaltvorgänge für Anlagen mit Motoren, Verdichtern und Pumpen kurzzeitig veränderten Bedingungen an. Bei Motoren vereinfachen sie die Benzineinspritzung sowie die Zünd- und Vergasersteuerung und ermöglichen eine Klopf- und Abgasüberwachung mit Sonden und Sensoren.

Computer überwachen als Prozeßrechner die Maschinen, steuern deren Belastung, messen deren Leistungen und Verbrauch und registrieren diese Vorgänge. In der Fertigungstechnik variieren sie die Bearbeitung und machen mit flexiblen Robotern verschiedene Ausführungen in einer Serie möglich. Insbesondere erlaubt aber die speziell entwickelte Software erweiterte Berechnungen für die Auslegung, die Beanspruchung, das Schwingungsverhalten und die Konstruktion mit Hilfe der finiten Elemente und von CAD. Dabei ergeben sich eine Fülle von Ergebnissen, für deren kritische Beurteilung und Auswahl dem Anfänger oft die nötige Erfahrung fehlt. Hierbei sollen die ausführlichen Diskussionen der besprochenen Erscheinungen und die 43 Zahlenbeispiele die notwendige Hilfestellung geben.

In der vorliegenden Auflage werden im Rahmen der Möglichkeiten die neuesten Entwicklungen berücksichtigt. Dies gilt insbesondere für die Thermodynamik und für die Vibe-Funktion zur Ermittlung des Stoffumsatzes, für die Nocken und hydraulischen Tassenstößel sowie für einige ältere Maschinenbeispiele.

Mein Dank gilt allen, die mir bei dieser Auflage geholfen haben. Dies gilt für die Unterlagen der Fachfirmen, die Beratung durch meine Kollegen und die kritische Mitarbeit meiner Leser, die den „Kolbenmaschinen“ ein Vierteljahrhundert die Treue hielten. Anregungen und Hinweise sind mir immer willkommen.

Berlin, im Sommer 1993

Karl-Heinz Küttner

## Aus dem Vorwort der 1. bis 5. Auflage

Alle Gattungen von Kolbenmaschinen, vor allem Brennkraftmaschinen sowie Kolbenpumpen und -verdichter, aber auch Maschinen mit rotierendem Verdränger wie der Wankelmotor und die Rotationskompressoren, sind heute in Fahrzeugen wie auch kleinen und großen ortsfesten oder beweglichen Anlagen und Aggregaten zu finden. Trotz der verschiedenartigen Aufgaben der Kolbenmaschinen ist ihnen bezüglich Aufbau und Betriebsweise vieles gemeinsam, z.B. die periodische Arbeitsweise, der Ladungswechsel sowie der Kompressions- und Expansionsvorgang. Hierbei sind die Pumpen als Grenzfall anzusehen.

Diese allen Maschinen eigenen Gemeinsamkeiten herauszustellen und so die scheinbare Vielfalt auf die für alle Maschinen gültigen Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen, ist das Ziel einer neuzeitlichen, die Grundlagen betonenden Ingenieurausbildung. Daher behandelt dieses Lehrbuch auch die Kolbenmaschinen in zusammenfassender Darstellung. So soll das Buch als straff gefaßter Leitfaden Studenten der Fachhochschulen und Technischen Hochschulen helfen, in die Materie hineinzufinden, und auch den Ingenieuren in der Praxis ein nützlicher Helfer sein, besonders wenn sie sich außerhalb ihres Fachgebiets mit Kolbenmaschinen befassen.

Der erste Abschnitt behandelt die physikalischen Grundlagen der Wärme- und Strömungslehre und die Konstruktionsgrundsätze für die Auslegung sowie den Massenausgleich und die Schwungradberechnung. Für die Maschinenelemente, insbesondere aber den Kurbeltrieb und die Nocken, sei auf das Werk „Köhler/Rögnitz, Maschinenteile“ im Teubner Verlag verwiesen. Die folgenden Abschnitte 2 bis 4 für die Pumpen, Verdichter und Brennkraftmaschinen beschreiben die Arbeitsweise und den Aufbau der Maschinentypen und vermitteln alle Berechnungsverfahren, die für die Ermittlung der Hauptabmessungen erforderlich sind. Diese Verfahren werden anhand einer Reihe von der Praxis entnommenen durchgerechneten Zahlenbeispielen veranschaulicht. Die für die Berechnung benötigten Erfahrungswerte und Kenndaten werden in diesen Beispielen oder in Tabellen mitgeteilt.

Wegen ihrer Bedeutung sind Brennkraftmaschinen und Verdichter ausführlicher dargestellt worden. Die Dampfmaschinen, deren Verwendung zurückgeht, werden lediglich im einführenden Abschnitt besprochen.

Die konstruktiven Besonderheiten der verschiedenen Kolbenmaschinen werden an Konstruktionszeichnungen mit Photos vorgestellt. Steuerungs- und Regelungseinrichtungen sind nach den in DIN 19 226 festgelegten Grundbegriffen behandelt. Auch Fragen des Betriebs und der Wartung wurde Aufmerksamkeit geschenkt. Leser, die sich über bestimmte Maschinen näher unterrichten wollen, werden auf Spezialwerke durch ein Literaturverzeichnis hingewiesen.

Mein Dank gilt allen Kollegen und Firmen, die mir bei der Abfassung des Buches geholfen haben.

# Inhalt

<b>Hinweise für die Benutzung des Werkes</b>	<b>9</b>
<b>1 Gemeinsame Eigenschaften der Kolbenmaschinen</b>	<b>13</b>
1.1 Grundlagen . . . . .	13
1.1.1 Arten und Wirkungsweise . . . . .	13
1.1.2 Berechnungsgrundlagen . . . . .	17
1.1.3 Arbeitsverfahren . . . . .	21
1.1.4 Mechanische Arbeit . . . . .	24
1.2 Thermodynamik der Kolbenmaschine . . . . .	28
1.2.1 Energieumsatz . . . . .	28
1.2.2 Wärmeaustausch . . . . .	37
1.2.3 Zustandsänderungen . . . . .	40
1.2.4 Gasgemische . . . . .	47
1.2.5 Strömungsvorgänge beim Ladungswechsel . . . . .	49
1.2.6 Bewertung des Energieumsatzes . . . . .	57
1.3 Auslegung einer Kolbenmaschine . . . . .	62
1.3.1 Kenngrößen und Drehzahl . . . . .	62
1.3.2 Einfluß der Zylinderzahl . . . . .	64
1.3.3 Baureihen . . . . .	67
1.3.4 Bauarten . . . . .	72
1.3.5 Konstruktive Gestaltung . . . . .	78
1.4 Triebwerk . . . . .	89
1.4.1 Kurbeltrieb . . . . .	89
1.4.2 Massenausgleich . . . . .	91
1.4.3 Laufruhe und Schwungrad . . . . .	123
1.5 Umweltaspekte . . . . .	136
1.5.1 Schadstoffe . . . . .	136
1.5.2 Lärmschutz . . . . .	139
<b>2 Kolbenpumpen</b>	<b>144</b>
2.1 Einteilung und Verwendung . . . . .	144
2.2 Berechnungsgrundlagen . . . . .	145
2.2.1 Massenströme, Geschwindigkeiten und Höhen . . . . .	145
2.2.2 Strömungsverluste . . . . .	147
2.2.3 Drücke . . . . .	148
2.2.4 Gestängekräfte und Saugfähigkeit . . . . .	149
2.3 Arbeiten, Leistungen und Wirkungsgrade . . . . .	153
2.3.1 Spezifische Arbeiten . . . . .	153
2.3.2 Leistungen und Wirkungsgrade . . . . .	154

## 6 Inhalt

2.4	Windkessel . . . . .	155
2.4.1	Berechnung der fluktuierenden Flüssigkeitsvolumen . . . . .	156
2.4.2	Schwingungen der Flüssigkeitssäule und Ungleichförmigkeitsgrad . . . . .	158
2.5	Ausgewählte Bauteile . . . . .	159
2.5.1	Stopfbuchsen . . . . .	159
2.5.2	Kolben . . . . .	160
2.5.3	Ventile . . . . .	161
2.6	Aufstellung und Betrieb . . . . .	162
2.6.1	Aufstellung . . . . .	162
2.6.2	Betrieb . . . . .	164
2.7	Ausgewählte Maschinen . . . . .	166
2.7.1	Schiffskolbenpumpe . . . . .	166
2.7.2	Schlitz-Plungerpumpe . . . . .	168
2.7.3	Stehende Plungerpumpe . . . . .	169
2.7.4	Hochdruckpumpe . . . . .	170
<b>3</b>	<b>Kolbenverdichter</b>	<b>172</b>
3.1	Aufbau und Verwendung . . . . .	172
3.2	Einstufige Verdichtung . . . . .	173
3.2.1	Massen und Volumina . . . . .	173
3.2.2	Schadraum . . . . .	174
3.2.3	Liefergrad . . . . .	175
3.2.4	Energieumsatz im Arbeitsraum . . . . .	177
3.2.5	Leistungen und Wirkungsgrade . . . . .	180
3.3	Mehrstufige Verdichtung . . . . .	184
3.3.1	Berechnungsgrundlagen . . . . .	184
3.3.2	Vergleich der ein- und mehrstufigen Verdichtung . . . . .	186
3.4	Bauarten . . . . .	188
3.4.1	Aufteilung der Stufen . . . . .	188
3.4.2	Anordnung der Zylinder und Triebwerke . . . . .	190
3.5	Auslegung und Kennlinien . . . . .	192
3.5.1	Auslegung . . . . .	192
3.5.2	Kennlinien . . . . .	193
3.5.3	Kennfelder . . . . .	195
3.6	Steuerungen . . . . .	199
3.6.1	Aufbau . . . . .	199
3.6.2	Wirkungsweise . . . . .	200
3.6.3	Berechnung der Ventile . . . . .	201
3.6.4	Sonderbauarten . . . . .	204
3.6.5	Anordnung der Ventile . . . . .	205
3.7	Kühlung und Schmierung . . . . .	212
3.7.1	Kühlung . . . . .	212
3.7.2	Schmierung . . . . .	216

3.8	Regelung . . . . .	219
3.8.1	Grundbegriffe . . . . .	219
3.8.2	Zweipunktregelung . . . . .	221
3.8.3	Stetige Regelung . . . . .	226
3.9	Anlagen und ausgeführte Verdichter . . . . .	233
3.9.1	Aufbau einer Anlage . . . . .	233
3.9.2	Ausgeführte Anlage . . . . .	236
3.9.3	Betrieb . . . . .	237
3.9.4	Ausgewählte Maschinen . . . . .	239
3.10	Verdichter mit rotierendem Verdränger . . . . .	244
3.10.1	Schraubenverdichter . . . . .	244
3.10.2	Rotationsverdichter . . . . .	251
<b>4</b>	<b>Brennkraftmaschinen</b>	<b>255</b>
4.1	Einteilung und Verwendung . . . . .	255
4.2	Berechnungsgrundlagen . . . . .	256
4.2.1	Arbeitsraum . . . . .	256
4.2.2	Ladung . . . . .	256
4.2.3	Leistungen und spezifische Größen . . . . .	259
4.3	Idealprozesse . . . . .	265
4.3.1	Seiligerprozeß . . . . .	266
4.3.2	Ottoprozeß . . . . .	271
4.3.3	Dieselprozeß . . . . .	272
4.3.4	Vergleich der Prozesse . . . . .	273
4.4	Ladungswechsel . . . . .	275
4.4.1	Viertaktmaschinen . . . . .	276
4.4.2	Zweitaktmaschinen . . . . .	282
4.4.3	Aufladung . . . . .	294
4.5	Gemischbildung . . . . .	301
4.5.1	Dieselmotoren . . . . .	301
4.5.2	Ottomotoren . . . . .	307
4.5.3	Schichtlademotoren . . . . .	323
4.6	Zündung und Verbrennung . . . . .	326
4.6.1	Zündung . . . . .	326
4.6.2	Wärmeumsatz . . . . .	335
4.6.3	Verbrennung . . . . .	337
4.7	Betriebsverhalten . . . . .	352
4.7.1	Belastungsänderung bei konstanter Drehzahl . . . . .	353
4.7.2	Drehzahländerung bei konstant eingestellter Kraftstoffzufuhr . . . . .	356
4.7.3	Motor als Antriebsmaschine . . . . .	358
4.8	Regelung . . . . .	368
4.8.1	Regelungstechnische Grundbegriffe . . . . .	368
4.8.2	Drehzahlregler . . . . .	369
4.8.3	Pneumatische Regler . . . . .	376

8 Inhalt

4.9	Ausgeführte Motoren . . . . .	379
4.9.1	Viertakt-Ottomotor . . . . .	379
4.9.2	Zweitakt-Dieselmotor . . . . .	381
4.9.3	Viertakt-Dieselmotor . . . . .	384
4.10	Sonderformen der Motoren . . . . .	386
4.10.1	Philips-Stirling-Motor . . . . .	386
4.10.2	Wankelmotor . . . . .	390
	<b>Sinnbilder</b>	<b>397</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>401</b>
	<b>DIN-Normen (Auswahl)</b>	<b>403</b>
	<b>Gesetze und Vorschriften</b>	<b>405</b>
	<b>Formelzeichen</b>	<b>406</b>
	<b>Bildquellenverzeichnis</b>	<b>409</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>410</b>