

ATZ/MTZ-Fachbuch

MAHLE GmbH Hrsg.

# Ventiltrieb

Systeme und Komponenten

**MAHLE**

 Springer Vieweg

---

# ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren machen einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

---

MAHLE GmbH (Hrsg.)

# Ventiltrieb

Systeme und Komponenten

Mit 287 Abbildungen

PRAXIS

*Herausgeber*  
MAHLE GmbH  
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-8348-2490-5

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

# Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

dieser dritte Band der MAHLE Produktkunde, einer mehrbändigen Fachbuchreihe, widmet sich ganz dem Ventiltrieb. Ein Thema, dem durch die anspruchsvollen Anforderungen an die Effizienz moderner Viertakt-Verbrennungsmotoren eine enorme Bedeutung zukommt. Die weitere Optimierung des Ladungswechsels ist entscheidend, um künftige Emissions- und Verbrauchsziele zu erreichen. Das gilt gleichermaßen für Otto- wie für Dieselmotoren. Schlüsselsystem dabei ist der Ventiltrieb, dessen Funktionalität und Auslegung entsprechend immer komplexer werden. Zum Beispiel etabliert sich der variable Ventiltrieb immer mehr zum Standard bei Ottomotoren – und wird künftig auch zur Absenkung der Emissionen beim Dieselmotor beitragen.

Die Belastungen der Bauteile, besonders verbrennungsseitig, wachsen durch steigende Brennraumdrücke und Temperaturen. Gepaart mit der immer höheren Leistungsfähigkeit des Systems Ventiltrieb ergibt sich daraus verstärkt ein Zielkonflikt durch die Forderung nach noch effizienterer Mechanik durch niedrigere Reibwerte und Leichtbau. Wichtig ist daher ein ganzheitliches Verständnis für das System und seine Komponenten, das dieses Buch ausführlich und in sehr anschaulicher Weise vermittelt.

Dieser dritte Band der Fachbuchreihe richtet sich in erster Linie wieder an Ingenieure und Naturwissenschaftler aus den Bereichen Entwicklung, Konstruktion und Instandhaltung von Motoren. Aber auch Professoren und Studenten der Fakultäten Maschinenbau, Motorentechnik, Thermodynamik und Fahrzeugbau sowie alle Leserinnen und Leser mit Interesse an modernen Otto- und Dieselmotoren werden auf den folgenden Seiten wertvolle Anregungen finden.

Ich wünsche Ihnen mit dieser Lektüre viel Freude und zahlreiche Anregungen.

Stuttgart, September 2012

  
Heinz K. Junker

# Danksagung

Wir danken allen Autoren, die an diesem Band mitgewirkt haben.

Dipl.-Ing. (FH) Rainer Barth  
Dr.-Ing. Christoph Beerens  
Dipl.-Ing. Roberto Cutrona  
Dipl.-Ing. René Dingelstadt  
B. Eng. Heiko Heckendorn  
Dipl.-Ing. Justus Himstedt  
Dipl.-Ing. Hermann Hoffmann  
Dipl.-Ing. Rolf Kirschner  
Dipl.-Ing. Volker Korte  
Dipl.-Ing. (FH) Michael Kreisig  
Dr. Walter Krepulat  
Dipl.-Ing. Arvid Lehrkamp  
Dipl.-Ing. Markus Lettmann  
Dipl.-Ing. (FH) Christoph Luven  
Dipl.-Ing. Alexander Müller  
Dipl.-Ing. Alexander Puck  
Dipl. Gwl. (mach) Falk Schneider  
Dipl.-Ing. Simon Streng  
Georg Strobel  
Dipl.-Ing. Matthias Vogelsang

Unser zusätzlicher Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Buches gilt  
Ruben Danisch und Laura Seiler.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabe von Ventiltriebssystemen</b>	1
1.1 Drehzahlanforderung	1
1.2 Belastung	2
1.3 Lebensdauieranforderung (Pkw/Nfz)	2
1.4 Ladungswechselrechnung	2
1.5 Eingangsgrößen zur Auslegung	4
1.6 Variabilität von Ventiltriebssystemen	5
1.7 Komfort (NVH)	6
<b>2 Ventiltriebskonfigurationen</b>	7
2.1 Einteilung von Ventiltriebssystemen	7
2.1.1 Einteilung nach Anordnung und Anzahl der Nockenwellen	7
2.1.2 Einteilung nach Nockenfolger	9
2.1.3 Einteilung nach Ventilspielausgleich	9
2.1.4 Unterscheidung Nutzfahrzeug und Personenkraftwagen	9
2.2 Schnittstellen des Ventiltriebs	10
2.2.1 Nockenwellenlagerung	10
2.2.2 Antrieb	10
2.2.3 Nockenfolger/Ventilgruppe	11
2.2.4 Abtrieb	12
2.3 Zylinderkopf	12
2.3.1 Brennraum	13
2.3.1.1 Verdichtungsverhältnis	13
2.3.1.2 Zahl und Anordnung der Ventile	14
2.3.1.3 Brennraumformen	17
2.3.2 Ladungswechselkanäle	19
2.3.2.1 Gestaltung der Einlasskanäle	19
2.3.2.2 Gestaltung der Auslasskanäle	21
2.3.3 Sekundärlufteinblasung und Abgasrückführung	22
2.3.4 Kühlmantel	22
2.3.4.1 Auslegungsgesichtspunkte	22
2.3.4.2 Durchströmungsrichtung	23
2.3.5 Ventilsteuerungsraum	24
2.3.5.1 Gestaltungsmerkmale	24
2.3.5.2 Schmierölversorgung	25



2.3.6	Anforderungen an die Strukturmechanik .....	26
2.3.6.1	Anforderungen der Zylinderkopfdichtung .....	26
2.3.6.2	Beanspruchungen und Steifigkeit des Brennraumbereichs .....	26
	Literaturnachweis .....	27
<b>3</b>	<b>Ventile, Ventilführungen und Ventilsitzringe .....</b>	<b>29</b>
3.1	Anforderungen an Ventile, -führungen und -sitzringe .....	29
3.1.1	Einlass und Auslass .....	33
3.1.2	Temperatur .....	34
3.1.3	Druck .....	35
3.1.4	Korrosion und Verschleiß .....	35
3.1.5	Betätigung .....	38
3.1.6	Reibung .....	38
3.1.7	Massenreduzierung .....	39
3.1.8	Lebensdauer .....	40
3.2	Ventile .....	40
3.2.1	Ausführungen .....	40
3.2.1.1	Hohlventile .....	43
3.2.1.2	MAHLE Leichtbauventil .....	43
3.2.2	Ventilwerkstoffe .....	45
3.3	Ventilsitzringe .....	46
3.3.1	Aufgabe und Funktion .....	46
3.3.2	Beanspruchung und Anforderungen .....	46
3.3.2.1	Tribopartner Ventil .....	48
3.3.2.2	Schmierung des Ventilsitzes .....	48
3.3.2.3	Thermische Beanspruchung .....	49
3.3.2.4	Tribochemische Beanspruchung .....	54
3.3.2.5	Mechanische Beanspruchung im Tribosystem Ventil/VSR .....	54
3.3.2.6	Montage .....	55
3.3.2.7	Bearbeitung .....	56
3.3.3	Werkstoffe .....	56
3.3.3.1	Fertigungsverfahren (Ventilsitzring-Herstellungsverfahren) ..	57
3.3.3.1.1	Gussfertigung .....	57
3.3.3.1.2	PM-Fertigung .....	58
3.3.3.1.3	Panzerung von VSR .....	60
3.3.3.2	Werkstoffe .....	61
3.3.3.2.1	Generelle Anforderungen .....	61
3.3.3.2.2	Gusswerkstoffe .....	61
3.3.3.2.3	PM-Werkstoffe .....	63
3.3.3.2.4	Panzerungswerkstoffe .....	64

3.3.4	Design und Toleranzen	65
3.3.4.1	Allgemein	65
3.3.4.2	Toleranzen Gusswerkstoffe	69
3.3.4.3	Toleranzen PM-Werkstoffe	69
3.4	Ventilführungen	70
3.4.1	Aufgabe und Funktion	70
3.4.2	Beanspruchung und Anforderungen	71
3.4.2.1	Tribopartner Ventilschaft	72
3.4.2.2	Schmierung	72
3.4.2.3	Thermische Beanspruchung	74
3.4.2.4	Tribochemische Beanspruchung	75
3.4.2.5	Mechanische Beanspruchung	76
3.4.2.6	Montage	77
3.4.2.7	Bearbeitung	77
3.4.3	Werkstoffe	78
3.4.3.1	Fertigungsverfahren	78
3.4.3.1.1	Guss- und Buntmetallfertigung	78
3.4.3.1.2	PM-Fertigung	79
3.4.3.2	Werkstoffe	80
3.4.3.2.1	Generelle Anforderungen	80
3.4.3.2.2	Gusswerkstoffe	81
3.4.3.2.3	Buntmetalle	81
3.4.3.2.4	PM-Werkstoffe	82
3.4.3.2.5	Übersicht VF-Werkstoffe	82
3.4.4	Design und Toleranzen	83
3.4.4.1	Allgemein	83
3.4.4.2	Toleranzen	86
3.5	Ventilschaftdichtung	87
3.6	Ventilfederteller	89
3.7	Ventilkegelstücke	90
3.8	Ventilfedern	90
	Literaturnachweis	92
<b>4</b>	<b>Nockenwellen</b>	<b>95</b>
4.1	Anforderungen an Nockenwellen	95
4.1.1	Abgriff	95
4.1.2	Lagerung	95
4.1.3	Lebensdauer	96
4.1.4	Reibleistung	97
4.1.5	Passende Konstruktionen für bestimmte Anwendungen	97

4.2	Gegossene Nockenwellen	98
4.2.1	Schalenhartguss-Nockenwellen	99
4.2.2	Sphäroguss-Nockenwellen mit induktiver Härtung	101
4.3	Gebaute Nockenwellen	102
4.3.1	Standard	103
4.3.2	Wälzgelagerte Nockenwellen (Low Friction Camshaft, LFC)	105
4.3.3	MAHLE CamInCam®	107
4.3.4	Nockenwellen mit integrierter Blow-by-Abscheidung	108
4.3.5	Nockenwellen in geschlossenem Lagerrahmen	109
4.4	Geschmiedete Nockenwellen	109
4.4.1	Geschmiedete Nockenwellen für Pkw-Motoren	110
4.4.2	Geschmiedete Nockenwellen für Nutzfahrzeug- und Großmotoren	110
4.5	Nockenwellen aus Vollmaterial gespannt	111
4.6	Sondernockenwellen	111
4.6.1	Trilobe	111
4.6.2	Bewegliche Nockensegmente	112
4.6.3	Dreidimensionaler Nocken	113
4.6.4	Kunststoff-Nockenwellen	114
4.6.5	Segmentnockenwellen	114
<b>5</b>	<b>Nockenfolger – Aufgabe und Funktion</b>	<b>115</b>
5.1	Nockenfolgertypen	115
5.1.1	Kipphebel	116
5.1.2	Schlepphebel	116
5.1.3	Tassenstößel	116
5.1.4	Teller- oder Pilzstößel	117
5.1.5	Rollenstößel	117
5.1.6	Weitere Komponenten	117
5.2	Gleitabgriff/Rollenabgriff	117
5.3	Anwendungsfelder	120
5.4	Komponenten im Detail	122
5.4.1	Hebel	122
5.4.1.1	Kipphebel	122
5.4.1.2	Schlepphebel	123
5.4.1.3	Spieleinstellung bei Hebeln	124
5.4.1.4	Mechanische Spieleinstellung	125
5.4.1.5	Hydraulische Spieleinstellung	126
5.4.1.6	Hubverlauf mit/ohne Öffnerrampe	127
5.4.2	Stößel	128
5.4.2.1	Flachstößel (OHV)	128
5.4.2.2	Tassenstößel (OHC)	129

5.4.2.3	Rollenstößel	130
5.4.2.4	Werkstoffe	132
5.4.3	Schaltbare Nockenfolger	132
5.4.3.1	Schaltbare Tassenstößel	133
5.4.3.2	Schaltbare Rollenstößel	133
5.4.3.3	Schlepphebel/Kipphebel mit Schaltfunktion	133
5.5	Lager bei Nockenfolgern	134
5.5.1	Lagerung der Rolle	134
5.5.1.1	Nadellager	134
5.5.1.2	Gleitlagerung	135
5.5.1.3	Befestigungsverfahren von Bolzen	136
5.5.1.4	Schmierölversorgung von Rollenlagerungen	138
5.5.2	Hebellagerung	138
5.5.3	Lagerung Elefantenfuß auf Einstellschraube	139
5.5.4	Verschleißanforderungen	140
5.5.4.1	Erster Motorstart	141
5.5.4.2	Start-Stopp-Betrieb	141
5.6	Reibung	141
5.7	Lebensdauer	143
	Literaturnachweis	144
<b>6</b>	<b>Variabilitäten im Ventiltrieb</b>	<b>145</b>
6.1	Gründe für Variabilitäten im Ventiltrieb	145
6.1.1	Definitionen	145
6.1.2	Grad der Variabilität	146
6.1.3	Anwendung beim Ottomotor	147
6.1.3.1	Maximierung der Füllung bei Volllast über dem Drehzahlband	147
6.1.3.1.1	Trägheitseffekt	147
6.1.3.1.2	Schwingrohraufladung	148
6.1.3.2	Entdrosselung in der Teillast	149
6.1.3.2.1	Variable Einlassöffnungsdauer	149
6.1.3.2.2	Ventilabschaltung (Zylinderabschaltung)	151
6.1.3.3	Restgassteuerung	151
6.1.3.4	Spülender Ladungswechsel (Scavenging)	153
6.1.3.5	Dynamische Temperaturabsenkung	155
6.1.4	Anwendung beim Dieselmotor	156
6.1.4.1	Ladungsbewegung zur Reduzierung von Rußemissionen	156
6.1.4.2	Verringerung von NO <sub>x</sub> -Emissionen	156
6.1.4.2.1	Reduziertes geometrisches Verdichtungs- verhältnis	157

6.1.4.2.2	Reduziertes effektives Verdichtungsverhältnis	157
6.1.4.3	Erhöhung Abgasenthalpie zum Katheizen und zur DPF-Regenerierung	158
6.1.5	Homogenes Niedertemperatur-Brennverfahren	158
6.2	Variable Ventiltriebsysteme	160
6.2.1	Nockenwellen-Verstellsysteme	164
6.2.2	Schaltbare Ventilsteuerungen	170
6.2.2.1	Ventilhubumschaltende Systeme	170
6.2.2.2	Ventilhubabschaltende Systeme (Zylinderabschaltung)	175
6.2.3	Stufenlos variierende Ventiltriebsysteme	180
6.2.3.1	Nockenwellenlose Ventilsteuerungen (direkt betätigte Systeme)	181
6.2.3.2	Stufenlos variierende Ventilsteuerungen mit Nockenwelle (indirekt betätigte Systeme)	188
6.2.4	Ausblick und Perspektiven	198
	Literaturnachweis	199
<b>7</b>	<b>Auslegung von Ventiltriebskomponenten</b>	<b>205</b>
7.1	Auslegungsziele	205
7.1.1	Steifigkeit	205
7.1.2	Gewicht	205
7.1.3	Tribologie	205
7.1.4	Ventilerhebungskurve	206
7.2	Kontaktauslegung	207
7.2.1	Analytische Betrachtung nach Hertz	207
7.2.2	Hertz'sche Pressungen	208
7.2.3	Balligkeit	210
7.2.4	Werkstoffauswahl	211
7.3	Tribologische Auslegung (Ventiltrieb)	211
7.4	Kinematische Auslegung	215
7.4.1	Kinematikmodell	215
7.4.2	Ladungswechsel	216
7.4.2.1	Öffnungsquerschnitt	216
7.4.2.2	Steuerzeiten	216
7.4.3	Aufsetzgeschwindigkeit	217
7.4.4	Antriebsmoment	217
7.4.5	Nockenprofil	217
7.4.5.1	Design des Nockenprofils	220
7.5	Dynamische Auslegung	221
7.5.1	Ergebnisse einer Dynamiksimulation	223
7.5.1.1	Vergleich Simulation – Messung	224

7.5.1.2	Optimierung einer Ventilhubkurve .....	224
7.5.2	Steifigkeitsauslegung .....	226
7.5.3	Eigenfrequenzen .....	227
7.5.4	Akustik .....	228
7.6	Bauteilauslegung mit FEM .....	228
7.6.1	Nockenwellen .....	229
7.6.1.1	Eigenfrequenz der Nockenwellen .....	229
7.6.1.2	Steifigkeit der Nockenwellen .....	231
7.6.1.2.1	Torsionssteifigkeit .....	231
7.6.1.2.2	Biegesteifigkeit .....	233
7.6.1.3	Verformungen und Spannungen unter Last .....	234
7.6.1.4	Gussnockenwellen .....	237
7.6.2	Nockenfolger .....	238
7.6.2.1	Eigenfrequenzen .....	238
7.6.2.2	Hebel .....	238
7.6.2.2.1	Steifigkeit .....	238
7.6.2.2.2	Spannungen unter Last .....	239
7.6.2.3	Stößel .....	241
7.6.2.3.1	Rollenstößel .....	241
7.6.2.3.2	Tellerstößel .....	244
7.6.2.3.3	Tassenstößel .....	244
7.6.3	Ventilgruppe .....	246
7.6.3.1	Ventile .....	247
7.6.3.2	Ventilsitzringe .....	249
7.6.3.3	Ventilführungen .....	249
	Literaturnachweis .....	250
<b>8</b>	<b>Erprobung von Ventiltriebssystemen .....</b>	<b>251</b>
8.1	Erprobungsziele bei Ventiltriebskomponenten .....	251
8.1.1	Grundfunktion .....	251
8.1.2	Haltbarkeit .....	252
8.1.3	Reibung und Verschleiß .....	252
8.1.4	Noise, Vibration, Harshness .....	253
8.2	Bauteilprüfung .....	254
8.2.1	Statische Bauteilprüfung .....	255
8.2.2	Dynamische Bauteilprüfung .....	256
8.2.2.1	Hochfrequenzpulsler .....	256
8.2.2.2	Umlaufbiegeprüfmaschine .....	256
8.2.2.2.1	Hochtemperatur-Umlaufbiegewechselfestig- keitsprüfung von Ventilwerkstoffen .....	256
8.2.2.2.2	Umlaufbiegeversuche an Nockenwellen .....	260

8.2.3	Relaxationsprüfstand	261
8.2.3.1	Relaxation von VSR	262
8.2.3.2	Versuchsaufbau	264
8.2.3.3	Versuchsergebnisse	265
8.3	Geschleppte Dauerlaufuntersuchungen	265
8.3.1	Verschleißuntersuchung an Nocken und Gegenläufer	267
8.3.2	Verschleißuntersuchung am Ventilsitz	269
8.3.2.1	Belastungen des Ventilsystems	269
8.3.2.1.1	Verschleiß am Ventilsitz	270
8.3.2.2	Erprobung des Ventilsystems	272
8.3.2.2.1	Verschleißmessung	272
8.3.2.3	VTR-Prüfstand – Entwicklungswerkzeug von MAHLE	273
8.3.2.3.1	Aufbau und Funktion	273
8.3.2.3.2	Vorläufige Versuchsergebnisse	274
8.3.2.4	Korrelation mit Motorergebnissen	275
8.3.3	SRV-Verschleißprüfstand	276
8.4	Messungen am Schleppprüfstand	277
8.4.1	Messung der Ventildynamik	279
8.4.2	Messung von Momenten	280
8.4.2.1	Messung des Momentenverlaufs	280
8.4.2.2	Messung des mittleren Reibmoments	281
8.5	Messungen im befeuerten Motor	282
8.5.1	Messung von Ventilhub und Betätigungskräften	283
8.5.2	Messung von Momenten	285
8.5.3	Messung der Ventiltemperatur	286
8.5.3.1	Thermometrische Verfahren zur Messung der Ventiltemperatur	287
8.5.3.1.1	Durchführung der Temperaturmessung	289
8.5.3.1.2	Ventiltemperaturen (exemplarische Ergebnisse)	290
8.5.3.2	Optische Messverfahren zur Messung der Ventiltemperatur	290
8.5.3.3	Messung der Ventiltemperatur mit Thermoelementen	291
8.5.3.3.1	Übertragung der Messwerte vom Thermoelement	291
8.5.3.3.2	Prinzip der MAHLE Messtechnik mit Thermoelementen	293
8.5.3.3.3	Applizierung der Messtechnik	293
8.5.3.3.4	Ventiltemperaturen (exemplarische Ergebnisse)	295
8.5.4	Dauerläufer	296
	Literaturnachweis	297

---

<b>Abkürzungen</b> .....	299
<b>Glossar</b> .....	301

**Hinweis:**

Einige Fachbegriffe werden am Ende des Buches im Glossar näher erklärt. Diese sind jeweils bei ihrer Erstnennung je Kapitel mit einem **(G)** gekennzeichnet.



# 1 Aufgabe von Ventiltriebssystemen

Die vorrangige Aufgabe des Ventiltriebs ist, den Ladungswechsel (G) für den Verbrennungsprozess zu steuern. Dazu benötigt er Energie, die von der Kurbelwelle geliefert wird. Ein effizienter Ventiltrieb kann somit den Wirkungsgrad (G) des Verbrennungsmotors erheblich verbessern.

Die Steuerung des Gaswechsels erfolgt heute fast ausschließlich über Tellerventile (G). Andere Konzepte haben nur eine sehr begrenzte Verbreitung. Bei großen Zweitakt-Dieselmotoren in Schiffen wird nur der Auslass mit Ventilen gesteuert, bei allen Viertaktmotoren der Ein- und Auslass. Kleine Otto-Zweitaktmotoren haben keine Ventile; sie werden über Schlitze im Zylinder gesteuert, was zwar einfacher ist, aber auch große Probleme bei Emissionen und Verbrauch nach sich zieht.

Aufgabe des Ventiltriebs ist es, sowohl Luft oder Frischgas in erforderlicher Menge zuzuführen als auch Abgas abzuführen, indem die Ventile zum richtigen Zeitpunkt öffnen und schließen. Erst dies ermöglicht einen geregelten Verbrennungsprozess im Motor.

## 1.1 Drehzahlanforderung

Die Drehzahlgrenze fast aller modernen Motoren ist durch die Grenzbeschleunigung der Ventile, besonders des Einlassventils, definiert. Ab dieser Drehzahlgrenze kann die Feder das Ventil nicht mehr kontrolliert zurückziehen, wodurch ein exakt definierter Ladungswechsel nicht mehr möglich ist. Der Verbrennungszyklus läuft nicht mehr optimal, der Motor nicht mehr rund.

Die Ventilfeeder und die Ventilmasse bestimmen zusammen diese Grenzdrehzahl. Eine hohe Federkraft erhöht allerdings nicht nur die Grenzdrehzahl, sondern auch die Reibung und damit den Kraftstoffverbrauch. In der Praxis werden Ventiltriebssysteme auf die geforderte Grenzdrehzahl ausgelegt, ohne zu viel Sicherheit einzubauen, um die Reibungsverluste zu minimieren. Überdrehzahlen, die zu Ventilspringen führen, erhöhen den Verschleiß beträchtlich und sind unbedingt zu vermeiden.

## 1.2 Belastung

Im Ventiltrieb muss besonders auf der Brennraumseite eine ausreichende Wärmeabfuhr sichergestellt sein, damit die Werkstoffe nicht überhitzen. Mit zunehmenden Verbrennungstemperaturen und -drücken werden folglich immer höher spezifizierte Werkstoffe erforderlich. Aus Kostengründen kann es günstiger sein, das Auslassventil hohl auszuführen und von innen mit flüssigem Natrium zu kühlen, als die üblichen hoch nickelhaltigen – und deswegen teuren – Legierungen einzusetzen.

Daneben ist der Verschleiß an den Kontaktflächen von Nockenwelle, Nockenfolgern, Ventil-schaftenden, Ventilsitz und Ventilführung (**G**) eine weitere Hauptbelastung. Durch eine saubere Spannungsauslegung können die Komponenten zwar die Belastung aus den Betätigungs-kräften meist gut ertragen. Der aus den Reibungskräften resultierende Verschleiß limitiert aber ihre Lebensdauer, insbesondere bei starren Ventiltrieben ohne hydraulische Ausgleichs-elemente.

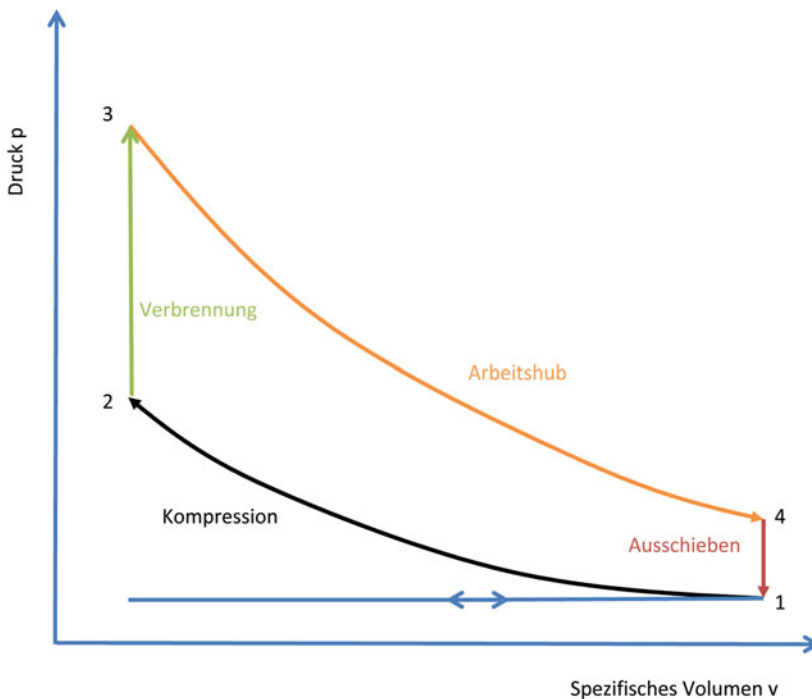
## 1.3 Lebensdaueranforderung (Pkw/Nfz)

Um die Herstellungskosten wirtschaftlich zu gestalten, wird die Lebensdauer der Ventiltriebs-komponenten in etwa der zu erwartenden Lebensdauer des Fahrzeugs angepasst. Das beginnt bei Rennwagen mit wenigen Stunden und einigen Hundert Kilometern und steigert sich bis zu Nutzfahrzeugen mit 1.600.000 Kilometern erwarteter Laufleistung. Für Sonder-fahrzeuge wie Transporter kann, etwa durch eine höherfeste Nockenwelle, die Lebensdauer eines Ventiltriebs auch an die erhöhten Anforderungen angepasst werden, bei ansonsten gleicher Geometrie.

## 1.4 Ladungswechselberechnung

Die eigentliche Kernaufgabe des Ventiltriebs, der Ladungswechsel, muss ausgelegt werden, um danach den Ventiltrieb selbst entwickeln zu können. Dazu haben sich einige Standard-werkzeuge etabliert, die hier kurz angerissen werden.

Für die Darstellung des Ladungswechsels bei Otto-, Diesel- und Zweitaktmotoren haben sich zwei Diagramme etabliert, die den Druck- und Volumenverlauf sowie den Temperatur- und Energieverlauf der Prozesse darstellen.



**Bild 1.1:** p-v-Diagramm für den Otto-Verbrennungsprozess

Das p-v-Diagramm zeigt die verschiedenen Phasen des Verbrennungsprozesses mit Hilfe der beiden Größen Druck ( $p$ ) und spezifisches Volumen ( $v$ ), **Bild 1.1**. Die Flächen unter der jeweiligen Teillinie – bzw. die geschlossene Fläche des Zustandsdiagramms – zeigen den Energieumsatz für den Teil- oder Gesamtprozess an.

Das T-s-Diagramm, **Bild 1.2**, zeigt die gleichen Phasen des Prozesses an, aber mit Hilfe der Zustandsgrößen Temperatur ( $T$ ) und Entropie ( $s$ ) (**G**). Wieder sind die Flächenintegrale proportional zum Energieumsatz.

Diese beiden Diagramme stellen den Gaswechsel allerdings in idealisierter Form dar. In der Realität kann, z. B. aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, keine isentrope (**G**) Zustandsänderung erreicht werden (Verschiebung 1-2 und 3-4 in **Bild 1.2**). Auch beim Gaswechsel haben die realen Bedingungen nicht-idealer Gase und begrenzter Geschwindigkeiten großen Einfluss. Die Phasen des Zyklus werden miteinander verkoppelt, die Abgrenzungen werden unscharf, die Ecken verschwinden aus den Diagrammen, es entsteht das Indikatordiagramm, **Bild 1.3**. Damit nimmt auch der Energieertrag etwas ab, der Wirkungsgrad wandelt sich vom idealen zum realen Motorwirkungsgrad.

Mit diesem Diagramm lassen sich immerhin die Energieverluste kausal identifizieren und verschiedene Konzepte energetisch bewerten.

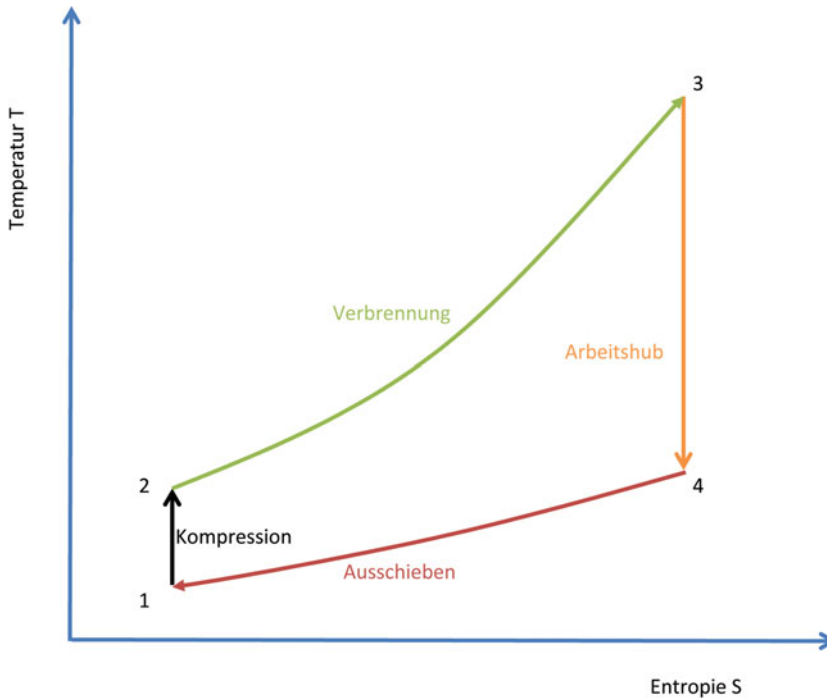


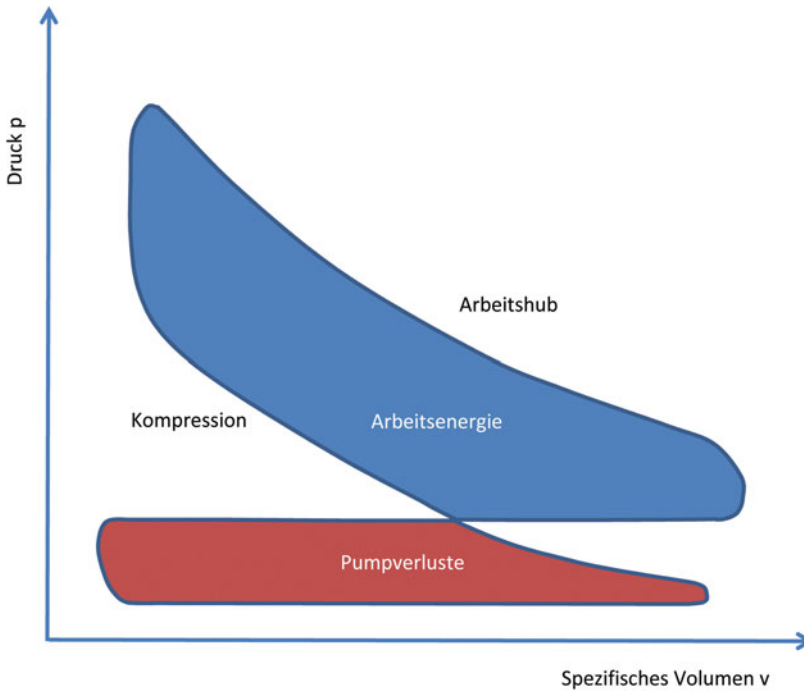
Bild 1.2: T-s-Diagramm für den Otto-Verbrennungsprozess

## 1.5 Eingangsgrößen zur Auslegung

Für einen Ventiltrieb sind vor der Auslegung einige Randbedingungen abzuklären:

- Benötigte Luftmengen des Motors
- Vorhandener Bauraum
- Grenzdrehzahl zur Auslegung der Federkräfte
- Zulässiges Reibmoment
- Art des Nockenabgriffs

Mit diesen Randbedingungen kann die Auslegung von Ventildurchmessern und -geometrien sowie der Nockenprofile beginnen, um die für den Ladungswechsel erforderliche Kinematik abzubilden.



**Bild 1.3:** Realer Prozess im p-v-Diagramm, Indikatorgramm

## 1.6 Variabilität von Ventiltriebssystemen

Früher hatten alle Ventiltriebssysteme fixe Steuerzeiten (G) und Hübe. Damit war es unmöglich, in allen Lastpunkten des Verbrennungsmotors einen idealen Ladungswechsel zu realisieren. Nachdem die ersten Ansätze mit elektromagnetischen oder piezogesteuerten Ventiltrieben sich nicht durchgesetzt haben, geht die Entwicklung jetzt mehr in Richtung variable Steuerung des Ventilhubes mit einem Nocken.

Seit einigen Jahren haben sich bei Ottomotoren Systeme etabliert, die durch Anpassung der Steuerzeiten [Phasensteller (G)] und/oder des Hubs (Schalttasse) die Verbrennung optimieren. Einige Systeme ermöglichen im Ottomotor eine quasi drosselfreie Laststeuerung, was den Wirkungsgrad wesentlich verbessert. Über reduzierte Kompression kann die Einlassventil-Steuerung im Miller- oder Atkinson-Zyklus (G) die Kompressionsverluste beim Ottomotor reduzieren. Bei niedrigen Drehzahlen sorgen Nockenwellen-Verstellungssysteme wie etwa die MAHLE CamInCam® (G) für ein höheres Drehmoment.

## 1.7 Komfort (NVH)

Die vom Ventiltrieb erzeugten Geräusche sind insbesondere auf das Ventilschließen zurückzuführen. Ein „sanftes“ Nockenprofil verringert die Aufsetzgeschwindigkeit des Ventils und somit die Geräuschemission. Je höher allerdings die spezifischen Leistungsanforderungen sind, umso weniger Rücksicht kann auf die Akustik genommen werden – insbesondere bei Saugmotoren. Das Aufsetzgeräusch ist dann nur noch durch eine geringere Masse der Einlassventile beeinflussbar. Auch Dieselmotoren für Nutzfahrzeuge unterliegen zunehmend strikten akustischen Grenzwerten, was eine allgemein weniger „scharfe“ Auslegung des Ventiltriebs verlangt. Damit der Ventiltrieb nicht das akustisch unangenehme „Stottern“ entwickelt, müssen die Torsionseigenfrequenzen der Nockenwellen größer als die zehnte Motorordnung sein.

## 2 Ventiltriebskonfigurationen

### 2.1 Einteilung von Ventiltriebssystemen

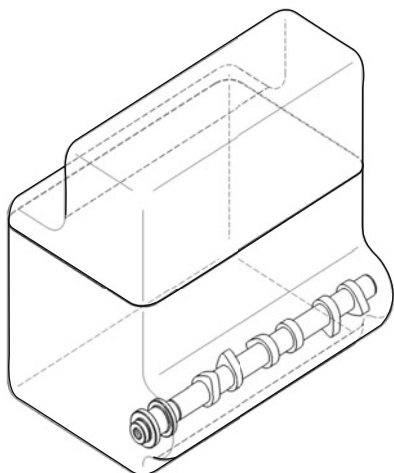
Ventiltriebssysteme werden nach unterschiedlichen Ordnungsmerkmalen eingeteilt. Die häufigsten beziehen sich auf die Nockenwellen und auf die Nockenfolger.

#### 2.1.1 Einteilung nach Anordnung und Anzahl der Nockenwellen

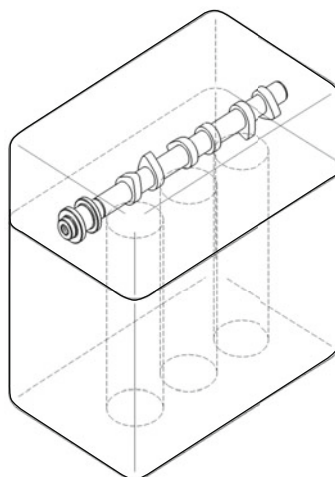
Ursprünglich hatten Verbrennungsmotoren eine einzelne Nockenwelle im Kurbelgehäuse, auf der sich die Einlass- und Auslassnockenprofile befanden. Dies wird als unten liegende Nockenwelle oder auch Overhead Valve (OHV) bezeichnet, **Bild 2.1**.

Diese Lösung ermöglichte eine einfache Zylinderkopfkonstruktion. Für eine bessere Steifigkeit im Ventiltrieb wurde die Nockenwelle zunehmend im Zylinderkopf angeordnet. Diese Ausführung wird als Single Overhead Camshaft (SOHC) bezeichnet, **Bild 2.2**.

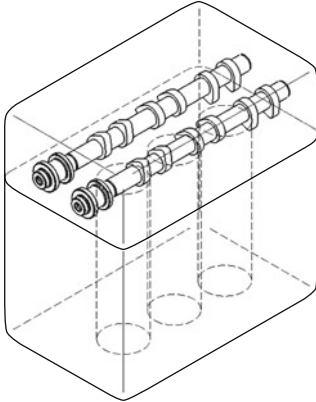
Mit den Anforderungen an erhöhte Drehzahlsteifigkeit und variable Ventilsteuerzeiten setzte sich mehrheitlich die Anordnung von zwei getrennten Nockenwellen im Zylinderkopf durch. Diese Konstruktion wird Double Overhead Camshaft (DOHC) genannt, **Bild 2.3**. Kennzeichen sind die jeweils separate Einlass- und Auslassnockenwelle. Die oben liegende Nockenwelle ermöglicht ein kompaktes und drehzahlfestes Ventiltriebssystem. Die Aufteilung der



**Bild 2.1:** OHV-Anordnung



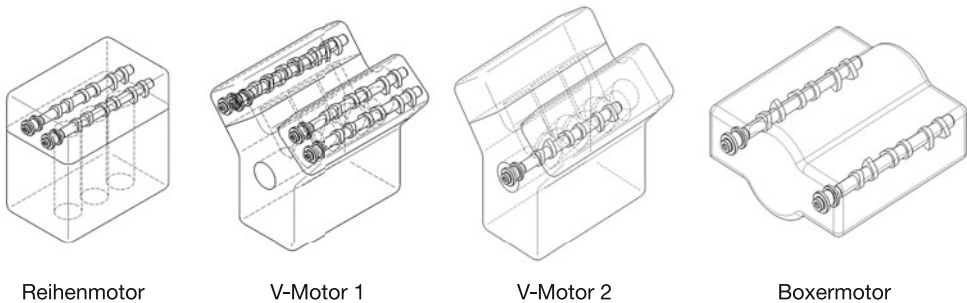
**Bild 2.2:** SOHC-Anordnung



**Bild 2.3:** DOHC-Anordnung

Ein- und Auslassprofile auf zwei Nockenwellen ist die Voraussetzung für die unabhängige Verstellung der Ventilsteuerzeiten.

Abhängig von der Zylinderanordnung und dem Motorkonzept variieren die Lage und die Anzahl der Nockenwellen. Bei Reihenmotoren werden meist zwei oben liegende Nockenwellen eingesetzt, **Bild 2.4**.



Reihenmotor

V-Motor 1

V-Motor 2

Boxermotor

**Bild 2.4:** Anordnungen Nockenwellen

Bei V-Motoren sind zwei Anordnungen verbreitet. Die häufigste umfasst zwei Nockenwellen je Zylinderbank, was in Summe vier Nockenwellen je Motor ergibt. Die zweite Anordnung bietet in den nordamerikanischen „cam in block“-Motoren Kosten- und Bauraumvorteile. Eine Nockenwelle ist hier zentral im „V“ oberhalb der Kurbelwelle angeordnet. Bei Boxermotoren befinden sich die Nockenwellen außen auf den Zylinderköpfen. Entsprechendes gilt für Sternmotoren.

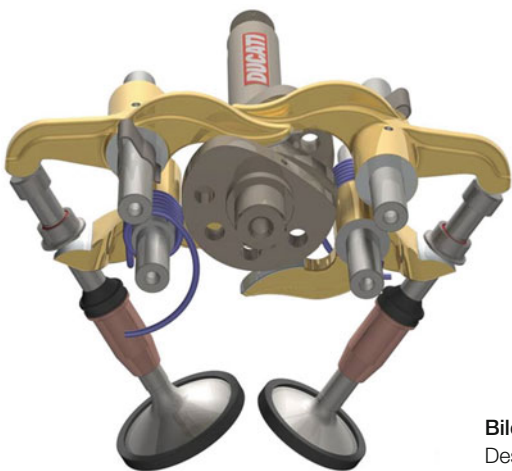
Für Motoren mit zwei Ventilen pro Zylinder reicht im Regelfall eine Nockenwelle aus. Bei Motoren mit mehr als zwei Ventilen pro Zylinder werden aufgrund des hemisphärischen Brennraums leichte Nockenfolger bevorzugt, die mit zwei getrennten Nockenwellen betätigt werden.



## 2.1.2 Einteilung nach Nockenfolger

Bei den Nockenfolgern wird grundsätzlich zwischen Gleit- und Rollenabgriff unterschieden. Dies bezieht sich auf die Kontaktstelle zwischen Nockenwelle und Nockenfolger. Der Gleitabgriff mit Flachtasche war bei Pkw-Motoren lange Zeit dominant. Mittlerweile ist der Rollenabgriff mit einem Rollenschlepphebel wegen der geringeren Reibleistung die bevorzugte Lösung für moderne Pkw-Motoren. Bei Nfz-Motoren sind Rollenstößel und Rollenkipphebel aus Gründen der hohen Lebensdauer dominant.

Eine Sonderform ist die desmodromische Ventilsteuerung. Ergänzend zum Ventilöffnerhebel kommt – statt der Ventildfeder – ein zweiter Nockenfolger beim Schließen des Ventils zum Einsatz. Dieser wird mit einem Komplementärprofil auf der Nockenwelle gesteuert, **Bild 2.5**. Diese Ausführung ist mittlerweile eine Randerscheinung.



**Bild 2.5:**  
Desmodromische Ventilsteuerung (Bild: Bluming)

## 2.1.3 Einteilung nach Ventilspielausgleich

Der Ventilspielausgleich (**G**) erfolgt entweder mechanisch (Einstellschraube) oder hydraulisch (HVA). Die Anordnung des Ventilspielausgleichselements kann auf zweierlei Art realisiert werden. Entweder ist es beweglich im Nockenfolger montiert, z. B. Einstellschraube im Nfz-Kipphebel, oder stationär im Zylinderkopf eingesteckt, z. B. hydraulisches Abstützelement unter einem Rollenschlepphebel.

## 2.1.4 Unterscheidung Nutzfahrzeug und Personenkraftwagen

Die Anforderungsprofile an Ventiltriebssysteme für Nfz oder Pkw unterscheiden sich in Bezug auf Lebensdauer, Drehzahlfestigkeit und mechanische Beanspruchung. Daher unterscheiden sich auch die Ausführungsformen grundlegend.

So ist ein Ventiltriebsystem für eine Pkw-Anwendung wegen der geforderten Drehzahlfestigkeit und der kleinen Ventile (Zylindervolumina bis etwa 0,5 l pro Zylinder) auf geringe bewegte Massen ausgelegt. Die Lebensdauerauslegung erfolgt hier üblicherweise auf eine Laufleistung von etwa 240.000 km.

Ein Ventiltriebsystem für eine Nfz-Anwendung hingegen ist zum Erreichen der Lebensdauer von etwa 1.600.000 km und der größeren wirksamen Kräfte (größere Ventile für Zylindervolumina von circa 2 l pro Zylinder und Motorbremsbetrieb) steifer gestaltet, verbunden mit erhöhten bewegten Massen.

## 2.2 Schnittstellen des Ventiltriebs

Das Ventiltriebsystem befindet sich bei modernen Pkw- und Nfz-Motoren im Zylinderkopf. Die Schnittstellen zu dessen Umgebung sind benachbarte Systeme und die Lagerung der Ventiltriebskomponenten.

### 2.2.1 Nockenwellenlagerung

Die Nockenwellenlagerung überträgt die Stützkräfte des Ventiltriebs in radialer und axialer Richtung auf den Zylinderkopf bzw. auf das Kurbelgehäuse.

Die Nockenwelle ist bei OHC-Motoren im Zylinderkopf gelagert. Dies ist die häufigste Ausführung bei Pkw-Motoren. Beispiele hierfür sind die offene Lagerung mit Lagerdeckeln, die Lagerung im Lagerrahmen oder in der Ventilhaube, siehe Kapitel 4.1.2.

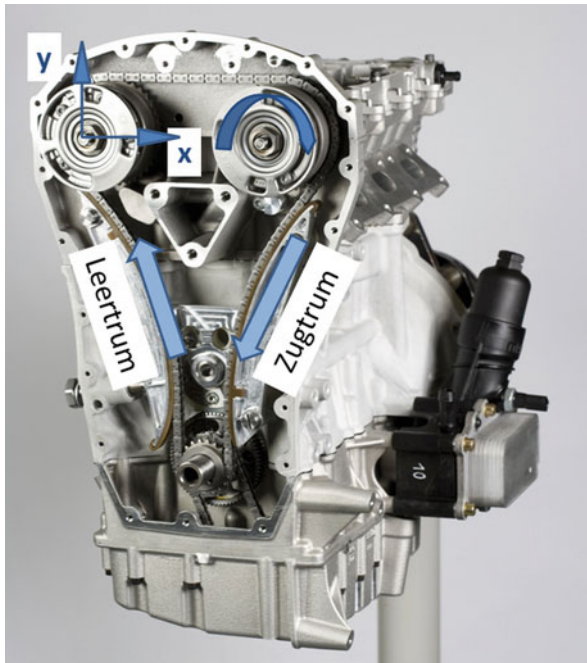
Bei OHV-Motoren ist die Nockenwelle im Kurbelgehäuse gelagert, was hauptsächlich bei klassischen Nfz-Motoren zur Anwendung kommt. Eine typische Ausführungsform ist hier die Tunnellagerung, siehe Kapitel 4.1.2.

Üblicherweise sind die Nockenwellenlager als hydrodynamische Gleitlager ausgeführt. Zur Reduktion der Reibleistungsverluste können diese wälzgelagert werden, siehe Kapitel 4.3.2.

### 2.2.2 Antrieb

Das antreibende System für das Ventiltriebsystem ist der Steuertrieb. Der Steuertrieb überträgt den Antriebsmoment und – je nach Ausführungsform unterschiedlich stark – Radial- und Axialkräfte.

Bei Pkw-Motoren werden Kettentriebe und Zahnriementriebe eingesetzt. Diese bringen ergänzend zum Antriebsmoment auch relevante Radialkräfte auf die Nockenwelle ein. Sie



**Bild 2.6:**  
Kräfte am Ketten- und Riementrieb

werden von der ersten Lagerstelle abgestützt, was zu einer asymmetrischen Kraftverteilung in den Lagerstellen führt, **Bild 2.6**.

Bei Nfz-Motoren ist der Zahnradtrieb die vorteilhafteste Lösung. Der Rädertrieb ist wartungsarm und bringt geringe Radialkräfte auf die Nockenwellenlagerung ein. Dies ist verglichen mit dem Ketten-/Zahnriementrieb mit Mehrkosten verbunden.

## 2.2.3 Nockenfolger/Ventilgruppe

Abhängig von der verwendeten Art des Nockenfolgers bildet dieser eine Schnittstelle des Ventiltriebs zum Zylinderkopf. Bei direkt betätigten Ventiltrieben ist die Flachtasche, siehe Kapitel 5.3, direkt in einer zylindrischen Ausnehmung des Zylinderkopfs gelagert. Gleiches gilt für Ventilsteuerungen mit achsgelagerten Hebeln, siehe Kapitel 5.4.1, wobei die Achsen in den Zylinderkopf gesteckt sind. Diese Achsen sind kostenintensiv und haben ein aufwendiges hydraulisches Ventilspielausgleichselement. Daher sind Ventilsteuerungen mit Rollenschlepphebeln stärker verbreitet, bei denen das hydraulische Ventilspielausgleichselement im Zylinderkopf eingesteckt ist.

Von der Ventilgruppe sind die Ventilführung (G) und die Ventilsitzringe (G) im Zylinderkopf eingesetzt, siehe Kapitel 3.3. Es wird zwischen Zwei- (ein Einlass- und ein Auslassventil pro Zylinder) und Mehrventilmotoren unterschieden.

## 2.2.4 Abtrieb

Von der Ventilsteuerung werden auch andere Systeme am Zylinderkopf angetrieben. Bei Dieselmotoren oder Ottomotoren mit direkter Einspritzung wird am antriebsfernen Ende der Nockenwelle in axialer Verlängerung häufig eine Vakuumpumpe angetrieben, **Bild 2.7**.

Es ist auch möglich, die Wasserpumpe von einem Nockenwellenende anzutreiben. Bei Ottomotoren mit direkter Einspritzung wird häufig in radialer Richtung eine Kraftstoff-Hochdruckpumpe angetrieben, **Bild 2.8**.



**Bild 2.7:** Nockenwellen-Abtrieb für Vakuumpumpe



**Bild 2.8:** Nockenabtrieb für Kraftstoff-Hochdruckpumpe

## 2.3 Zylinderkopf

Der Zylinderkopf eines Viertakt-Hubkolbenmotors ist eine der Baugruppen mit dem größten Einfluss auf dessen effektive Kenndaten, wie Drehmoment und Leistung sowie Abgasemissionen und effektiven Wirkungsgrad (**G**). Die wichtigsten Aufgaben und Funktionen des Zylinderkopfs sind:

- Aufnahme des Brennraums (oder eines Teils des Brennraums)
- Aufnahme der Kanäle für den Ladungswechsel (**G**)
- Aufnahme der Ventile des Ladungswechsels und des Ventiltriebs
- Aufnahme der Zündkerze (Ottomotor)
- Aufnahme der Einspritzdüsen (Diesel- und Ottomotoren mit Direkteinspritzung)
- Aufnahme von Sekundärluftzufuhr und Abgasrückführung (**G**)
- Aufnahme der Zylinderkopfverschraubung
- Schnittstelle zu Einlassluftsammler und Abgaskrümmen (mit Dichtstellen)
- Schnittstelle zum Kurbelgehäuse (mit Zylinderkopfdichtung)
- Ausreichende Kühlung

- Ausreichende Strukturfestigkeit
- Ausreichende Schmierölaufuhr
- Ausreichende Schmierölrückführung

Bei der Auslegung und Konstruktion eines Zylinderkopfs werden in vielen Fällen Bohrung, Zylinderabstand und die Zylinderkopfverschraubung durch die Fertigungseinrichtungen von bereits vorhandenen Motoren bestimmt.

## 2.3.1 Brennraum

Die Brennraumgeometrie mit der Zahl und Position der Ventile, dem Anschluss der Ein- und Auslasskanäle, der Lage von Zündkerze und Einspritzdüse sowie dem Verdichtungsverhältnis ist maßgebend für die Qualität der Verbrennung im Motor.

### 2.3.1.1 Verdichtungsverhältnis

In einem idealen Motor steigt der Wirkungsgrad der Verbrennung mit zunehmendem Verdichtungsverhältnis mit einer immer weiter abflachenden Charakteristik an. In realen Motoren liegt das optimale Verdichtungsverhältnis bei circa  $\varepsilon = 14$  bis 15. Dies ist durch die sowohl bei Otto- wie bei Dieselmotoren mit steigendem  $\varepsilon$  zunehmenden Reibungsverluste bedingt. Darüber hinaus ist bei Ottomotoren das Auftreten klopfender Verbrennung bzw. bei Dieselmotoren deren Kaltstartverhalten eine wichtige Auslegungsgrenze. Die **Tabelle 2.1** zeigt typische Werte für das Verdichtungsverhältnis ausgeführter Motoren.

Bei Ottomotoren wird das maximale Verdichtungsverhältnis durch das Auftreten klopfender Verbrennung begrenzt und durch Kraftstoff, die Größe der Zylinder, die Ladungsbewegung in den Zylindern und die Kühlungsverhältnisse beeinflusst. Weitere Einflüsse ergeben sich z. B. durch die geforderte Drehmomentcharakteristik und das Rückströmen heißer Abgase

**Tabelle 2.1:** Typische Werte für das Verdichtungsverhältnis ausgeführter Motoren

Motortyp	$\varepsilon$		Begrenzung durch
	von	bis	
Ottomotor (2-Takt)	7,5	10	Glühzündung
Ottomotor (4-Takt, 2 Ventile/Zylinder)	8	10	Klopfen, Glühzündung
Ottomotor (4-Takt, 4 Ventile/Zylinder)	9	12	Klopfen, Glühzündung
Ottomotor (4-Takt, Direkteinspritzung)	11	14	Klopfen, Glühzündung
Dieselmotor (Vor- und Wirbelkammer Pkw)	18	24	Kaltstart, Wirkungsgrad, Bauteilbelastung
Dieselmotor (Direkteinspritzung Pkw)	17	21	Kaltstart, Wirkungsgrad, Bauteilbelastung
Dieselmotor (Direkteinspritzung Lkw)	15	17	Kaltstart, Wirkungsgrad, Bauteilbelastung

in den Verbrennungsraum (auch durch den Turbolader). Viele der Mechanismen werden mit Simulationsprogrammen untersucht, allerdings ist das Auftreten des Klopfens kaum vorhersehbar. Der Entwicklungsingenieur wählt einen Bereich des Verdichtungsverhältnisses auf Basis seiner Erfahrungen aus. Dieser wird am Motorprüfstand detailliert untersucht und so das Optimum bestimmt.

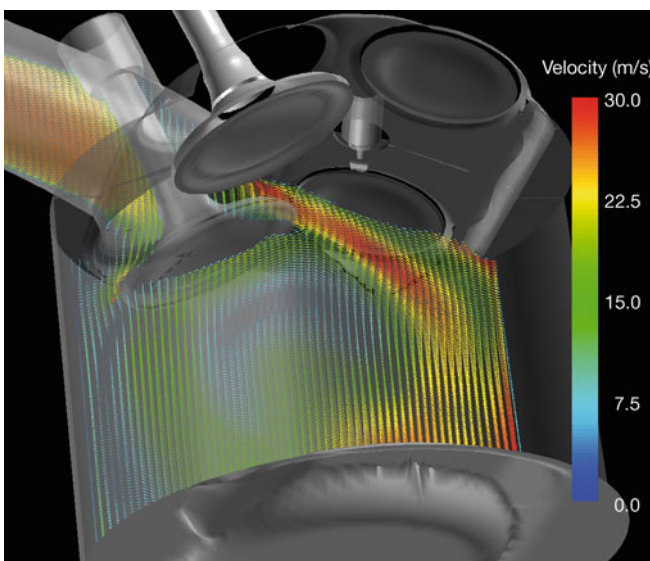
### 2.3.1.2 Zahl und Anordnung der Ventile

Die meisten modernen Otto- und Dieselmotoren für Fahrzeuganwendungen haben heute vier Ventile pro Zylinder. Allerdings haben auch Motoren mit zwei oder drei Ventilen pro Zylinder ihre Daseinsberechtigung.

Ein wichtiger Aspekt sind die Kosten. Eine Ventilkonfiguration mit je einem Ein- und Auslassventil ist eine günstige Lösung wegen der kleineren Zahl an Ventilen, Ventilführungen und -sitzen, Dichtungen, Federn, Halterungen und Ventilkegelstücken sowie auch wegen des einfacheren Ventiltriebs.

Um die Zahl bzw. die Größe der Ventile festzulegen, wird zu Beginn der Zylinderkopfauslegung meist eine Ladungswechselberechnung durchgeführt, **Bild 2.9**.

Der Motor braucht einen ausreichenden Ventilöffnungsquerschnitt, um den gewünschten Luftdurchsatz als Voraussetzung für die gewünschte Vollastcharakteristik zu erreichen. Dieser wird durch die Ventilhubkurve sowie zusätzliche Faktoren, wie z. B. der Geometrie der Ein- und Auslasskanäle, vorgegeben. Dabei sind Erfahrungen und Korrelationen aus vorherigen Simulationen unerlässlich.



**Bild 2.9:**  
Eindimensionales Modell einer  
Ladungswechselberechnung