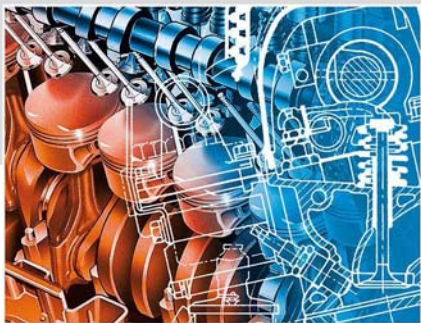


Volkmar Küntscher / Werner Hoffmann (Hrsg.)

KRAFTFAHRZEUG- MOTOREN

Auslegung und Konstruktion



Vogel Buchverlag



Prof. Dr.-Ing. habil. Volkmar Küntscher
Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Hoffmann (Hrsg.)

Kraftfahrzeugmotoren

Auslegung und Konstruktion

5., überarbeitete und ergänzte Auflage

Vogel Buchverlag

Die Herausgeber und Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. VOLKMAR KÜNTSCHER, Jahrgang 1939,
verstorben im Februar 2005

Prof. Dr.-Ing. habil. WERNER HOFFMANN, Jahrgang 1947,
Westfälische Hochschule Zwickau
übernahm nach Prof. Küntschers Tod die Herausgeberschaft

Die Mitautoren:

Dr.-Ing. HEIKO NEUKIRCHNER, Jahrgang 1968,
IAV GmbH, Chemnitz

Dipl.-Ing. MATTHIAS KRATZSCH, Jahrgang 1969,

Dipl.-Ing. ANDREAS ROSENEK, Jahrgang 1962,
IAV GmbH, Berlin

JEAN MARC CHERIERE, Senior Entwicklungsingenieur,

PIERRE MIRAN, Berechnungsingenieur,

ALAIN SCHMITT, Produktmarketing Manager,

Dr. ANDRÉ SIMONNEAU, Vorentwicklungsingenieur,

Lead Center Zylinderkopfdichtung Freudenberg Meillor

Hon. Prof. Dr.-Ing. MICHAEL DURST, Jahrgang 1952,
Universität Stuttgart

Dr.-Ing. GUNNAR-MARCEL KLEIN, Jahrgang 1964,

Dr. rer. nat. NIKOLAUS MOSER, Jahrgang 1949,

Mann & Hummel GmbH Ludwigsburg

Prof. Dr.-Ing. WOLFGANG FOKEN, Jahrgang 1953,

Prof. Dr.-Ing. MATTHIAS THEIN, Jahrgang 1954,

Prof. Dr.-Ing. STEFFEN ZWAHR, Jahrgang 1961,

Westfälische Hochschule Zwickau

Dr.-Ing. UWE MOHR, Jahrgang 1955

MAHLE GmbH, Stuttgart

Dipl.-Ing. MIRKO SIERAKOWSKI, Jahrgang 1965

IGS Zwickau

Prof. Dr.-Ing. habil. HEINZ GLÄSER, Jahrgang 1935

Prof. Dr.-Ing. HORST SCHÄDLICH, Jahrgang 1935,

Dr.-Ing. ERNST BEUTNER, Jahrgang 1941,

Dr.-Ing. BERND HÄNEL, verstorben

Die Autoren haften nicht für evtl. fehlgegangene Motorkonstruktionen, -instandsetzungen oder sonstige Ereignisse, die, von welcher Seite auch immer, mit den im Buch enthaltenen Ausführungen in Verbindung gebracht werden.

Hinweise und Vorschläge zur Verbesserung des Buches werden von Verlag und Autoren jederzeit gern entgegengenommen.

Weitere Informationen:

www.vogel-buchverlag.de



<http://twitter.com/vogelbuchverlag>



www.facebook.com/vogel.buchverlag



www.vogel-buchverlag.de/rss/buch.rss

ISBN 978-3-8343-3206-6

5. Auflage, 2014

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2006 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort zur 5. Auflage

Der gute Anklang, den die 4. Auflage gefunden hat, ist sehr erfreulich und Anerkennung für die viele Mühe, denen sich die Autoren beim Verfassen ihrer Kapitel unterzogen haben. Die strukturelle Anlage des Buches und die darin enthaltenen Zusammenhänge und Informationen haben ein offenbar recht breites Interesse gefunden, so dass eine weitgehend unveränderte Nachauflage denkbar gewesen wäre. Es hat sich aber bei den Vorbereitungen zur 5. Auflage gezeigt, dass an einigen Stellen neben der wohl unvermeidlichen Druckfehlerberichtigung doch noch die eine oder andere Problemstellung der Berücksichtigung bzw. Präzisierung bedurfte. Das hat u.a. beispielsweise dazu geführt, dass, aktuellen Diskussionen folgend, eine rechnerische Abschätzung des Strecken-bezogenen Kohlendioxidausstoßes aufgenommen worden ist. Und schließlich wurden die Kapitel 4 und 5 teils grundlegend überarbeitet.

Generell bleibt noch festzustellen, dass das Buch Kraftfahrzeugmotoren durchaus nicht nur für den Verbrennungsmotorenbauer gedacht ist. Vielmehr sollen insbesondere mit den Ausführungen zur Konstruktion auch die Studierenden und die in der Praxis tätigen Ingenieure bis hin zum allgemeinen Maschinenbau angesprochen werden.

Im Weiteren soll auch noch auf das ebenfalls im Vogel Buchverlag erschienene Buch *Motorschäden* hingewiesen sein. Die Entwicklungsanstrengungen haben zwar den «fehlerfreien Motor» zum Ziel, aber allein schon der unvermeidbare Verschleiß beim Betrieb der Motoren und die Unmöglichkeit, eine Auslegung auf unbegrenzt lange Betriebsdauer vornehmen zu können, sind Gründe genug dafür, dass eben doch ab und an Motorschäden auftreten können. So gesehen sind beide Bücher als Einheit zu betrachten.

Außerdem sei an dieser Stelle den Lesern der Onlineservice InfoClick des Vogel Buchverlags (vgl. Anfang des Buches) empfohlen.

Dem Vogel Buchverlag gilt der Dank der Autoren für die sorgfältige und gute Ausstattung des Buches.

Zwickau

Werner Hoffmann

Der Onlineservice InfoClick bietet unter www.vbm-fachbuch.de nach Codeeingabe eventuell zusätzliche Informationen und Aktualisierungen. Fordern Sie für Ihr E-Book den Code unter info@vbm-fachbuch.de an!

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Merkmale und Besonderheiten von Verbrennungsmotoren im Zusammenhang mit der Anwendung als Antrieb von Maschinen bzw. Fahrzeugen (WERNER HOFFMANN)	19
<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	<i>34</i>
2 Grundlagen (HORST SCHÄDLICH)	37
2.1 Begriffe und Einteilung	37
2.2 Hauptabmessungen	49
2.2.1 Zylindergeometrie	49
2.2.2 Schnellläufigkeit	53
2.2.3 Arbeitsfähigkeit	60
2.2.4 Leistungsfähigkeit	77
2.3 Auslegungsbeispiele	79
2.3.1 Beispiel 1: Pkw-Motor	80
2.3.2 Beispiel 2: Nkw-Motor	85
2.4 Verdichtungsverhältnis	86
2.5 Pleuelstangenverhältnis	88
2.6 Kraftstoff- und Luftverbrauch	89
2.7 Motormasse und Einbaumaße	92
2.8 Leistungsangaben und Bezugzustand	96
2.9 Kennlinien und Kennfelder	101
<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	<i>107</i>
3 Thermodynamik der Verbrennungsmotoren (STEFFEN ZWAHR)	111
3.1 Einleitung	111
3.2 Vereinbarungen und thermodynamische Grundlagen	114
3.3 Praktische Grenzen der Kreisprozesse und Grenzprozesse	122
3.4 Auswirkungen der Anordnung der Wärmezufuhr	132
3.4.1 Konstantes Verdichtungsverhältnis	132
3.4.2 Konstantes Druckverhältnis	139
3.5 Teillastverfahren	141
3.5.1 Qualitätsregulierung	141
3.5.2 Quantitätsregulierung	143
3.5.2.1 Drosselregulierung	144
3.5.2.2 Alternatives Verfahren – «Frühes Einlass Schließt» (FES)	151
3.6 Aufladung	156
3.6.1 Abgas-Turboaufladung	157
3.6.2 Mechanische Aufladung	164
3.7 Prozess des vollkommenen Motors	167
3.8 Reale Arbeitsprozessrechnung	169
3.8.1 Modellansätze	169

3.8.2	Einzonnenmodell	171
3.8.2.1	Berechnungsgrundlagen	171
3.8.2.2	Ausgewählte Ergebnisse der Simulation	177
3.9	Prozessanalyse	184
3.9.1	Indizieren und Analyse des Druckverlaufs	184
3.9.2	Heizverlauf und Brennverlauf	187
3.9.3	Approximation des Brennverlaufs mit einer Vibefunktion	192
3.9.4	Detaillierte Verlustanalyse	193
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	199
4	Gemischbildung und Verbrennung (WERNER HOFFMANN)	203
4.1	Allgemeine Verbrennungstheorie	203
4.1.1	Elementare Formen des Verbrennungsprozesses	204
4.1.2	Einleitung der Verbrennung, Reaktionsgeschwindigkeit, Kettenreaktion	207
4.1.2.1	Selbstzündungsvorgang	208
4.1.2.2	Kettenreaktion	210
4.1.2.3	Flammenfront	211
4.1.2.4	Fremdzündung	214
4.1.2.5	Diffusionsverbrennung	214
4.2	Kraftstoff und chemische Grundlagen der Verbrennungsprozesse	215
4.2.1	Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren	215
4.2.1.1	Aliphatische bzw. kettenförmige Kohlenwasserstoffe	215
4.2.1.2	Ringförmige Kohlenwasserstoffe	217
4.2.1.3	Organische Sauerstoffverbindungen	219
4.2.1.4	Alternative Kraftstoffe	221
4.2.2	Verbrennung, Mindestluftbedarf, Heizwert	222
4.2.2.1	Verbrennungsreaktionen und Mindestluftbedarf, Luftverhältnis	222
4.2.2.2	Heizwert	228
4.2.2.3	Abgaszusammensetzung und Verbrennungsluftverhältnis	234
4.3	Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor	236
4.3.1	Entwicklung der Theorien zur Verbrennung im Dieselmotor	236
4.3.2	Kraftstoffstrahl	238
4.3.2.1	Strahlausbreitung und Zerstäubung	238
4.3.2.2	Tropfenverdampfung und Einleitung der Zündung	243
4.3.3	Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren	245
4.3.3.1	Erforderlicher Verbrennungsablauf	245
4.3.3.2	Beeinflussung des Verbrennungsablaufs	247
4.3.3.3	Brennräume	249
4.3.3.4	Luftbewegung	252
4.3.4	Abgaszusammensetzung bei Dieselmotoren und Maßnahmen zu deren Beeinflussung (WERNER HOFFMANN, MATTHIAS KRATZSCH, ANDREAS ROSENEK)	263
4.4	Dieseinspritzanlagen	275
4.4.1	Aufbau und Funktion kantengesteuerter Einspritzanlagen	276
4.4.2	Auslegung kantengesteuerter Einspritzanlagen	280
4.4.3	Beeinflussung von Einspritzzeitpunkt und Einspritzmenge	295
4.4.3.1	Spritzversteller	295
4.4.3.2	Regler	296
4.4.4	Zeitgesteuerte Dieseinspritzsysteme	302
4.4.4.1	Elektronisch gesteuerte Verteilerpumpen	302
4.4.4.2	Zeitgesteuerte Unit-Injector- und Unit-Pump-Systeme	305
4.4.4.3	Common-Rail-System – Speichereinspritzsystem	308
4.4.4.4	Piezo-Common-Rail-System	318
4.5	Gemischbildung und Verbrennung im Ottomotor	329
4.5.1	Allgemeines	329

4.5.2	Verbrennungsablauf	331
4.5.2.1	Normale und anomale Verbrennung	332
4.5.2.2	Gestaltung klopf- und glühzündungsunempfindlicher Brennräume	338
4.5.3	Vergasermotor	344
4.5.3.1	Wirkungsweise des Vergasers und Vergasergrobauslegung	347
4.5.3.2	Vergaserbauarten	354
4.5.4	Saugrohrgestaltung und Gemischverteilung	357
4.5.4.1	Kraftstoffzerstäubung und -verdampfung	357
4.5.4.2	Saugrohrgestaltung	359
4.5.5	Benzineinspritzung	363
4.5.5.1	Art der Kraftstoffeinspritzung	365
4.5.5.2	Mechanische Einspritzanlagen	366
4.5.5.3	Elektronische Motorsteuerungen	367
4.5.5.4	Elektronisch gesteuerte Saugrohr-Benzineinspritzanlagen	369
4.5.5.5	Elektronisch gesteuerte Benzin-Direkteinspritzanlagen	373
4.5.6	Zündung und Zündanlage (MATTHIAS THEIN)	386
4.5.6.1	Motorische Anforderungen an die Zündanlage	388
4.5.6.2	Hochspannungserzeugung und Funkenentladung	393
4.5.6.3	Komponenten	416
4.5.6.4	Motormanagementsystem – Zündwinkelgütegrad	426
4.5.7	Emissionen der Fahrzeuge mit Ottomotor (WERNER HOFFMANN, MATTHIAS KRATZSCH, ANDREAS ROSENEK)	428
4.6	Gesetzliche Anforderungen zu Emissionen von Verbrennungsmotoren (MATTHIAS KRATZSCH, ANDREAS ROSENEK)	435
4.6.1	Einführung	435
4.6.2	Abgasgesetzgebung in den USA	436
4.6.2.1	Fahrzeugzulassung	436
4.6.2.2	Emissionsstandards der EPA – Tier 2	437
4.6.2.2.1	Abgastestprozeduren der EPA	437
4.6.2.2.2	Nachweis der Dauerhaltbarkeit emissionsbeeinflussender Bauteile	440
4.6.2.2.3	Emissionsgrenzwerte der EPA	440
4.6.2.2.4	OBD-Anforderungen der EPA	442
4.6.2.3	Emissionsstandards der CARB	443
4.6.2.3.1	Emissionsgrenzwerte der CARB – LEV-2-Programm	444
4.6.2.3.2	OBD-Anforderungen der CARB	445
4.6.2.3.3	Emissionsgrenzwerte der CARB – LEV-3-Programm	446
4.6.3	Abgasgesetzgebung in der europäischen Union	447
4.6.3.1	Fahrzeugzulassung	447
4.6.3.2	Neuer Europäischer Fahrzyklus NEFZ2000	447
4.6.3.3	Grenzwerte in der Europäischen Union	448
4.6.3.4	Dauerhaltbarkeitsnachweis, Verschlechterungsfaktoren	450
4.6.3.5	On-Board-Diagnose (OBD)	452
4.6.3.6	CO ₂ -Flottenverbrauch	453
4.6.4	Abgasrollenprüfstand	454
4.6.5	Prüfverfahren auf dem Motorenprüfstand – Leistungsprüfung	454
	Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	458
5	Ladungswechsel (WERNER HOFFMANN)	467
5.1	Aufgaben und Bewertung des Ladungswechsels	467
5.2	Ladungswechselsteuerung und Steuerquerschnitte	480
5.3	Ventilsteuerungen und Merkmale der konstruktiven Ausführung	490
5.4	Kinematik des Nockentriebs und der Ventilsteuerung	495
5.4.1	Kreisbogennocken mit Stößelrolle	500
5.4.2	Tangentennocken mit Stößelrolle	506
5.4.3	Kreisbogennocken mit Flachstößel	507

5.4.4	Kinematische Eigenschaften unterschiedlicher Nocken- bzw. Ventiltriebe . . .	509
5.5	Berechnung und Auslegung von Ventilsteuerungen	517
5.5.1	Bewegungsfunktionen am Stößel	517
5.5.2	Kräfte und Kraftwirkungen an den Bauteilen der Ventilsteuerung	519
5.5.3	Auslegung von Ventildfedern	539
5.6	Konstruktion von Ventilsteuerungen und deren Bauteile	558
5.6.1	Ventildfedern	559
5.6.2	Ventile	562
5.6.3	Ventilsitzringe	564
5.6.4	Ventilschaftführungen	565
5.6.5	Verbindung Federteller und Ventil - Ventildrehung und Ventildrehvorrichtungen	566
5.6.6	Kipp- bzw. Schleppebel	569
5.6.7	Stößelstangen	569
5.6.8	Stößel, Nocken und Nockenwellen	570
5.6.9	Automatischer Spielausgleich	576
5.6.10	Einfluss von Elastizität und Masse der Ventiltriebbauteile auf Bewegungsablauf und Schwingungseigenschaften der Ventiltriebe	579
5.7	Steuertrieb	581
5.7.1	Zahnradsteuertrieb	586
5.7.2	Zugmittelsteuertriebe	587
5.8	Instationäre Strömungsvorgänge beim Ladungswechsel der Motoren	603
5.8.1	Mathematische Grundlagen	603
5.8.2	Theorie kleiner Wellen	604
5.8.3	Schwingungstheorie	614
5.8.4	Abstimmung des Ladungswechsels von Viertaktmotoren nach der Schwingungstheorie	619
5.8.5	Ähnlichkeitsbeziehungen beim Viertaktmotor	622
5.9	Variable Motorsteuerung und Ladungswechselanlagen von Viertaktmotoren	628
5.9.1	Variable Motorsteuerung	628
5.9.2	Zusammenwirken von Ladungswechselanlage und Motorsteuerung	644
5.10	Auslegung des Ladungswechsels von Zweitaktmotoren	654
5.10.1	Steuerung des Zweitaktmotors	654
5.10.2	Spülung	657
5.10.3	Abstimmung des Ladungswechsels von Zweitaktmotoren mit Kurbelkastenspülung und Schlitzsteuerung	660
5.10.3.1	Bemessung der Steuerquerschnitte	661
5.10.3.2	Auslegung des Ansaugrohrs	667
5.10.3.3	Auslegung der Auspuffanlage	669
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	673
6	Aufladung (STEFFEN ZWAHR)	687
6.1	Aufgaben und Anliegen	687
6.2	Stationäre und dynamische Eigenschaften des aufgeladenen Motors	688
6.3	Laderbauarten	695
6.3.1	Lader nach Verdrängerbauart	695
6.3.2	Lader nach Strömungsbauart	701
6.4	Mechanische Aufladung	703
6.4.1	Grundlagen	703
6.4.2	Beispiel zur Laderanpassung	707
6.5	Abgas-Turboaufladung	712
6.5.1	Abgas-Turbolader	712
6.5.2	Stau- und Stoßaufladung	715
6.5.3	Anpassung des Laders – Hauptgleichungen der Abgas-Turboaufladung	717
6.5.4	Beispiel zur Laderauswahl	721

6.5.5	Ladedruckregelung	728
6.5.6	Besonderheiten bei Ottomotoren	731
6.6	Ladeluftkühlung	735
6.7	Ausgewählte Sonderverfahren	739
6.7.1	Druckwellenlader	740
6.7.2	Modifikationen der Abgas-Turboaufladung	742
6.8	Möglichkeiten zur Verbrauchs- und Schadstoffverringering an Otto- und Dieselmotoren	746
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	749
7	Motorakustik (WOLFGANG FOKEN)	753
7.1	Motorgeräusch und gesetzliche Vorschriften	754
7.2	Akustische Mess- und Auswertetechnik	755
7.2.1	Messgrößen des Schallfeldes	755
7.2.2	Auswertung von Schallsignalen	755
7.2.3	Messverfahren und Messräume	757
7.3	Geräuschestehung, Weiterleitung und Abstrahlung	759
7.3.1	Teilschallquellen und Entstehungsmechanismen	759
7.3.2	Weiterleitung und Abstrahlung	761
7.4	Maßnahmen zur Geräuschreduktion	763
7.4.1	Direkte Schallquellen	763
7.4.2	Indirekte Schallquellen	765
7.5	Berechnungsverfahren zur Simulation	768
7.6	Psychoakustik und Sound-Design	770
7.7	Entwicklungstendenzen	773
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	774
8	Kühlsystem (MIRKO SIERAKOWSKI)	777
8.1	Strömungstechnische Grundlagen	778
8.1.1	Druckgleichung nach Bernoulli	778
8.1.2	Druckverlust und Strömungswiderstand	779
8.1.3	Strömungswiderstände von geraden Rohrleitungen, Krümmern, Querschnittsveränderungen und Verzweigungen	782
8.1.4	Kühlmittelstoffwerte	783
8.1.4.1	Wasser	783
8.1.4.2	Kühlmittelgemische	783
8.1.4.3	Luft	787
8.2	Wärmebilanz des Kühlsystems	787
8.2.1	Wärmestrom des Motors	787
8.2.2	Wärmestromverteilung im Kühlkreislauf	790
8.3	Flüssigkeitskühlung	791
8.3.1	Kühlungsarten	791
8.3.1.1	Pumpenumlaufkühlung	791
8.3.1.2	Druckkühlung	793
8.3.1.3	Thermosiphonkühlung	794
8.3.1.4	Verdampfungskühlung	795
8.3.1.5	Kühlung mit unterschiedlichem Temperaturniveau	796
8.3.2	Kühlmittelpumpen	797
8.3.2.1	Aufbau und Arten von Kfz-Kühlmittelpumpen	797
8.3.2.2	Kühlmittelseitige Abdichtung der Kühlmittelpumpe	799
8.3.2.3	Auslegung, Berechnung und Kennwerte von Kühlmittelpumpen	801
8.3.2.4	Kavitationsuntersuchungen an Kühlmittelpumpen	805
8.3.2.5	Regelbare Kühlmittelpumpen	807
8.3.3	Flüssigkeitskühler	809
8.3.3.1	Allgemeines	809

8.3.3.2	Rippenrohrkühler	810
8.3.3.3	Lamellenkühler	811
8.3.3.4	Kühlerwerkstoffe	811
8.3.3.5	Spezifische Kühlleistung und Wärmedurchgangszahl	812
8.3.3.6	Kühlluftseitiger Strömungswiderstand	816
8.3.3.7	Kühlmittelseitiger Strömungswiderstand	817
8.3.4	Öl-Kühlmittel-Wärmetauscher	819
8.3.5	Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung	820
8.3.5.1	Charakteristik der Kühlkreislauf-Strömungswiderstände	820
8.3.5.2	Grundlagen zur Verkettung von Kühlkreislaufwiderständen	822
8.3.5.3	Numerische Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung	826
8.3.5.4	Rechentchnische Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung	828
8.3.5.5	Grafische Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung	828
8.3.6	Regelung des Kühlsystems – Wärmemanagement	830
8.3.6.1	Allgemeines	830
8.3.6.2	Kühlmittelseitige Regelung	831
8.3.6.3	Luftseitige Kühlsystemregelung	833
8.3.7	Auslegung von Kfz-Kühlsystemen	837
8.3.7.1	Allgemeines	837
8.3.7.2	Temperaturen im Kfz-Kühlsystem	837
8.3.7.3	Druckverteilung im Kühlkreislauf und Druckaufbau im Ausgleichbehälter	840
8.3.7.4	Vernetzung und Wärmebilanz des Kühlsystems	843
8.3.7.5	Ermittlung der erforderlichen Volumenströme	843
8.3.7.6	Festlegung der kühlmittelseitigen Strömungswiderstände	843
8.3.7.7	Auswahl der Kühlmittelpumpe	845
8.3.7.8	Kavitationsuntersuchungen an Kühlkreislaufbauteilen	845
8.3.7.9	Simulierter Motorbetrieb	847
8.3.7.10	Prüfstandsuntersuchungen bei Motorbetrieb	848
8.3.7.11	Luftseitige Auslegung von Kühler und Heizungswärmetauscher	849
8.3.7.12	Ermittlung des Kühlluftstroms und der Kühlerabmessung	849
8.3.7.13	Ermittlung der kühlluftseitigen Strömungswiderstände	851
8.3.7.14	Auswahl des Kühllüfters unter Berücksichtigung des Staueinflusses	851
8.3.7.15	Auswahl der Lüftereinrichtung	854
8.3.7.16	Simulierter kühlluftseitiger Motorbetrieb	854
8.3.7.17	Windkanal und Fahrversuche	855
8.4	Luftkühlung	856
8.4.1	Vergleich von Flüssigkeits- und Luftkühlung	856
8.4.2	Wärmeübergang von Brenngasen zur Kühlluft	856
8.4.3	Verrippungsprobleme	860
8.4.3.1	Wärmeübergang	860
8.4.3.2	Erwärmung der Kühlluft im Rippenkanal	861
8.4.4	Strömungsverhältnisse	863
8.4.4.1	Strömung der Kühlluft im Rippenkanal	863
8.4.4.2	Einfluss der Kühlluftführung am Zylinder	866
8.4.4.3	Kühlluftwiderstände, Leistungsbedarf, Lüfteranordnung	866
8.4.5	Auswahl des Kühllüfters	868
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	869
9	Filtration (MICHAEL DURST, GUNNAR-MARCEL KLEIN, NIKOLAUS MOSER)	873
9.1	Einleitung	873
9.2	Grundlagen der Filtration in Kraftfahrzeugen	878
9.2.1	Systematik der mechanischen Trenntechnik	878
9.2.2	Beschreibung von dispersen Partikelsystemen	879

9.2.3	Trenngrad, Fraktionsabscheidegrad und Filterfeinheit	881
9.2.4	Filterstandzeit und Schmutzkapazität	884
9.2.5	Quellen und Beschreibung der abzutrennenden Partikel	884
9.2.6	Abscheidemechanismen	885
9.3	Filtration von Motoransaugluft	892
9.3.1	Aufgaben der Motoransaugluft-Filtration	892
9.3.2	Methoden zur Untersuchung von Luftfiltermedien	900
9.3.3	Luftfiltermedien	905
9.3.4	Auslegungskriterien für Luftfilterelemente	910
9.3.5	Luftfilterbauformen	913
9.4	Abscheidung von Öltröpfchen aus Blow-by-Gasen	922
9.4.1	Aufgaben der Kurbelgehäuseentlüftung	923
9.4.2	Abscheideverfahren und ausgeführte Beispiele	924
9.5	Filtration von Motorenöl	928
9.5.1	Aufgaben der Ölfiltration und Einfluss auf den Verschleiß	928
9.5.2	Filtermedien zur Schmierölfiltration – Filterfeinheit und chemische Beständigkeit	933
9.5.3	Hauptstromölfiltration	941
9.5.4	Nebenstromölfiltration	944
9.5.5	Ölfiltermodule	947
9.6	Filtration von Kraftstoff	950
9.6.1	Aufgaben der Kraftstofffiltration – Schutz des Einspritzsystems	950
9.6.2	Prüfverfahren und Spezifikationen für Kraftstofffilter	957
9.6.3	Filtermedien und Filterelemente	970
9.6.4	Kraftstofffilter und Kraftstofffiltermodule – Übersicht und Bauformen . .	977
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	<i>984</i>
10	Kurbeltrieb (WERNER HOFFMANN)	987
10.1	Beschreibung der Bewegungsvorgänge	988
10.2	Kräfte und Kraftwirkungen im Kurbeltrieb	999
10.2.1	Kräfte am Kolben	1002
10.2.2	Kräfte und Kraftwirkungen der Pleuelstange	1006
10.2.3	Kräfte am Kolbenbolzen	1021
10.2.4	Kräfte und Kraftwirkungen am Kurbelzapfen	1026
10.2.5	Kräfte an den Wellenzapfen (Grundlagerkräfte)	1033
10.3	Massenkräfte und Massenkraftwirkungen am Motor	1037
10.3.1	Massenkräfte beim Einzylindermotor	1037
10.3.2	Bewertung des natürlichen Massenausgleichs bei Mehrzylindermotoren . .	1048
10.4	Belastungen und Beanspruchungen der Kurbelwelle	1064
10.5	Ungleichförmigkeitsgrad und Schwungrad	1071
10.6	Schwingungsvorgänge	1079
10.6.1	Grundlagen	1081
10.6.2	Drehschwingungsprobleme	1098
10.6.2.1	Drehschwingungersatzsystem	1098
10.6.2.2	Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen	1112
10.6.2.3	Erregende Kräfte	1119
10.6.2.4	Resonanzdrehzahlen	1124
10.6.2.5	Resonanzausschläge	1125
10.6.3	Maßnahmen gegen Drehschwingungen	1138
10.6.3.1	Natürliche Maßnahmen	1139
10.6.3.2	Zusatzeinrichtungen	1141
10.6.3.3	Vermeiden von Drehschwingungen an Motorenprüfständen und bei Aggregaten	1149
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	<i>1153</i>

11	Triebwerkslagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren (HEINZ GLÄSER)	1165
11.1	Aufgabe und Wirkungsweise von Lagerungen	1165
11.2	Arten der Lager im Verbrennungsmotor und ihre Belastung	1168
11.3	Hydrodynamische Berechnung der Radialgleitlager	1171
11.3.1	Theoretische Grundlagen	1171
11.3.1.1	Begriffsbestimmung	1171
11.3.1.2	Hydrodynamischer Druckaufbau	1171
11.3.2	Berechnung der Wellenverlagerungsbahn	1180
11.3.3	Berechnung der Reibungsleistung	1189
11.3.4	Berechnung der Öldurchsatzmenge	1195
11.3.5	Wärmebilanz	1206
11.3.6	Maximaler Schmierschichtdruck	1209
11.3.7	Umwandlung der raumfesten in körperfeste Koordinaten	1215
11.3.7.1	Grundlager	1215
11.3.7.2	Pleuellager	1216
11.3.7.3	Kolbenbolzenlager	1217
11.3.8	Winkelgeschwindigkeiten der Lager eines Kurbeltriebes	1217
11.4	Auslegung von Verbrennungsmotoren-Gleitlagern	1218
11.4.1	Bedeutung und Möglichkeiten der Lagerauslegung	1218
11.4.2	Rechenprogramme zur Auslegung dynamisch beanspruchter Radialgleitlager	1222
11.4.2.1	Einfache und komplexe Rechenprogramme, EHD- und TEHD-Berechnung	1222
11.4.2.2	Programminhalt und Leistungsumfang des Rechenprogramms LAGER95	1225
11.4.3	Einflussgrößen bei der Lagerauslegung	1230
11.4.3.1	Einfluss des Betriebszustandes	1230
11.4.3.2	Einfluss des Schmierstoffes und des relativen Lagerspiels	1235
11.4.3.3	Einfluss von Ölzuführungstemperatur und Ölzuführungsdruck	1237
11.4.3.4	Art und Lage der Ölzuführung	1242
11.4.3.5	Steifigkeit von Welle, Lager und lagerumgebenden Bauteilen	1246
11.4.3.6	Einfluss der Kurbelwellengestaltung (Massenausgleich)	1248
11.4.4	Schlussfolgerungen für die Lagerauslegung aus der Anwendung von Rechenprogrammen	1250
11.4.5	Konstruktive Gestaltung der Lager von Motoren	1252
11.5	Werkstoffe und Konstruktionsgrundsätze für Kfz-Motoren-Gleitlager	1260
11.5.1	Anforderungen, Eigenschaften und Werkstoffgruppen	1260
11.5.2	Herstellung und Bauformen dünnwandiger einbaufertiger Lagerschalen und Buchsen	1264
11.5.3	Konstruktive Grundsätze bei der Anwendung dünnwandiger einbaufertiger Lagerschalen	1274
11.5.3.1	Gehäusebohrung, Lagerspiel, Spreizung, Freiräumung	1274
11.5.3.2	Presssitz der Lagerschalen in der Gehäusebohrung und Lagerspielveränderung im Betriebsbereich des Motors	1277
11.6	Schmierstoffe für Kraftfahrzeugmotoren	1283
11.6.1	Aufgaben und Klassifikation der Motorenöle	1284
11.6.2	Viskosität von Ölen	1291
11.6.3	Additive	1293
11.6.4	Ölprüfung, Ölwechsel, Ölverbrauch	1295
11.7	Axiallagerung	1297
11.8	Wälzgelagertes Triebwerk	1299
11.9	Schmiersystem	1304
11.9.1	Funktion, Bestandteile und grundsätzliche Wirkungsweise	1304
11.9.2	Schmierstoffbehälter, Ansaugen und Rückführung des Öls	1305

11.9.3	Schmierstoffkühlung	1306
11.9.4	Schmierstoffförderung, Versorgung der Schmierstellen	1307
11.9.5	Zweitaktmotoren-Schmierung	1311
11.10	Schäden und Veränderungen an Verbrennungsmotoren-Gleitlagern	1312
11.10.1	Schäden und Veränderungen am Lagermetall oder an der Drittschicht	1313
11.10.1.1	Verschleiß	1313
11.10.1.2	Verschmutzung	1318
11.10.1.3	Überhitzung	1319
11.10.1.4	Ermüdung	1320
11.10.1.5	Erosion	1322
11.10.1.6	Kavitation	1322
11.10.1.7	Tribochemische Reaktion, Korrosion	1325
11.10.1.8	Einbaufehler	1327
11.10.1.9	Fehler des Lagerherstellers	1328
11.10.2	Schäden an der Stahlstützschale	1329
11.10.2.1	Reiboxidation am Schalenrücken	1329
11.10.2.2	Stützschaalenbruch	1330
11.10.2.3	Stoßflächenbeschädigung	1331
11.10.2.4	Spreizungsverlust	1331
11.10.3	Austausch von Lagern	1331
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	1332
12	Konstruktion von Verbrennungsmotoren und deren Bauteilen (WERNER HOFFMANN)	1337
12.1	Zylinderkopf (WERNER HOFFMANN, HEIKO NEUKIRCHNER)	1357
12.1.1	Aspekte der funktionell-konstruktiven Gestaltung	1357
12.1.2	Werkstoffe	1370
12.1.3	Gießverfahren und Herstellung von Zylinderköpfen	1372
12.1.4	Belastungen und Beanspruchungen bei Zylinderköpfen	1375
12.1.5	Auslegung und Gestaltung der Ladungswechselkanäle	1381
12.2	Zylinder und Kurbelgehäuse (WERNER HOFFMANN, HEIKO NEUKIRCHNER)	1401
12.2.1	Grundsätzliche Aufgaben, Funktionen und Anforderungen	1401
12.2.2	Ausführungsformen von Zylinder, Kurbelgehäuse und Lagerung Kurbelwelle	1405
12.2.3	Einfluss der Kurbelgehäusegestaltung auf Steifigkeit, Belastbarkeit, Deformationen und Montagebedingungen	1414
12.2.4	Werkstoffe	1421
12.2.5	Gießverfahren, Gestaltungsmerkmale und Besonderheiten von Zylinderkurbelgehäusen	1423
12.2.6	Ausgewählte konstruktive Details und Lösungen	1426
12.2.7	Entwicklung stark belastbarer massearmer Kurbelgehäuse	1451
12.3	Zylinderkopfdichtung (WERNER HOFFMANN, HEIKO NEUKIRCHNER, PIERRE MIRAN, Dr. ANDRÉ SIMONNEAU, ALAIN SCHMITT, JEAN MARC CHERIERE)	1454
12.3.1	Dichtungskonzepte	1455
12.3.2	Rechnerische Auslegung einer Abdichtung mit Verschraubungen	1464
12.4	Kolben (UWE MOHR, HORST SCHÄDLICH)	1476
12.4.1	Aufgaben und Anforderungen	1476
12.4.1.1	Einführung und Begriffe	1476
12.4.1.2	Kolbenbelastung	1478
12.4.1.3	Kolbenbeanspruchung	1487
12.4.2	Hauptabmessungen und Gestaltung	1496
12.4.3	Werkstoffe und Herstellung	1504
12.4.3.1	Aluminiumlegierungen	1504
12.4.3.2	Gusseisenlegierungen	1506
12.4.3.3	Stähle	1506

12.4.3.4	Alternative Kolbenwerkstoffe	1506
12.4.4	Kolbenaußenkontur	1506
12.4.5	Kolbenkühlung	1509
12.4.6	Kolbenringe	1512
12.4.6.1	Aufgaben und Anforderungen	1512
12.4.6.2	Funktion	1513
12.4.6.3	Klassifizierung und Ausführungsformen	1515
12.4.6.4	Bewertungskenngrößen	1517
12.4.6.5	Werkstoffe	1524
12.4.6.6	Herstellung	1525
12.4.7	Kolbenbolzen	1526
12.4.7.1	Funktion und Anforderungen	1526
12.4.7.2	Hauptabmessungen und Gestaltung	1527
12.4.7.3	Berechnung	1529
12.4.7.4	Werkstoffe und Herstellung	1537
12.4.8	Kolbenbolzensicherungen	1539
12.5	Peuel (WERNER HOFFMANN)	1541
12.5.1	Aspekte der funktionell-konstruktiven Gestaltung	1541
12.5.2	Ausgewählte Werkstoffe, Herstellung von Rohteilen und fertigen Peueln	1551
12.5.3	Auslegung von Peuelstangen (WERNER HOFFMANN, BERND HÄNEL)	1555
12.6	Kurbelwelle (WERNER HOFFMANN)	1581
12.6.1	Aufgaben, Funktion und Anforderungen	1581
12.6.2	Motorspezifische Ausführungsformen	1582
12.6.3	Kurbelwellendesign – Entwurf und Hauptabmessungen	1587
12.6.4	Werkstoffe und Herstellung von Kurbelwellen-Rohteilen	1589
12.6.5	Bearbeitung von Kurbelwellen-Rohteilen zu Fertigteilen	1592
12.6.6	Rechnerischer Dauerfestigkeitsnachweis für Kurbelwellen (BERND HÄNEL, WERNER HOFFMANN)	1596
12.6.6.1	Belastungen an einer Kurbelkröpfung	1596
12.6.6.2	Dauerfestigkeitsnachweis nach dem Nennspannungskonzept für die Hohlkehle zwischen Kurbelzapfen und Kurbelwange	1605
12.6.6.3	Dauerfestigkeitsnachweis nach dem örtlichen Spannungskonzept für die Hohlkehle zwischen Kurbelzapfen und Kurbelwange	1614
12.6.6.4	Dauerfestigkeitsnachweis nach dem Nennspannungskonzept für die Ölbohrung des Kurbelzapfens	1618
12.6.6.5	Dauerfestigkeitsnachweis nach dem örtlichen Spannungskonzept für die Ölbohrung des Kurbelzapfens	1623
12.6.7	Bewertung der Auslegungskonzepte und Ergänzungen zum Auslegungsbeispiel (WERNER HOFFMANN)	1626
12.6.8	Experimentelle Dauerfestigkeitserprobung	1631
	<i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i>	1633
13	Virtuelle Produktentwicklung (ERNST BEUTNER, HEIKO NEUKIRCHNER)	1651
13.1	Vorbemerkungen	1651
13.2	Der Produktentwicklungsprozess im Wandel	1651
13.2.1	Von technischen Berechnungen zur virtuellen Bauteilentwicklung	1651
13.2.2	Vom hardwareorientierten zum simulationsgestützten Entwicklungsprozess	1652
13.3	Produktbezogene Daten	1654
13.3.1	Datenmodelle	1654
13.3.2	Generierung der Produktmodelle	1656
13.3.2.1	Direkte Geometriemodellierung	1656
13.3.2.2	Reverse Engineering	1659

13.3.3	Datenmanagement	1660
13.3.4	Digital Mock-Up (DMU)/Virtual Reality (VR)	1662
13.4	Simulationsgestützte Bauteilentwicklung	1665
13.4.1	Allgemeines	1665
13.4.2	Methoden der Berechnung und Simulation	1665
13.4.2.1	Mehrkörpersysteme (MKS)	1667
13.4.2.2	Finite-Elemente-Methoden (FEM)	1668
13.4.2.3	Strömungssimulation	1670
13.4.3	Funktionsorientierte simulationsgestützte Bauteilentwicklung	1673
13.4.3.1	Grundmechanik	1673
13.4.3.2	Ladungswechsel, Arbeitsprozess	1680
13.4.3.3	Gemischbildung, Verbrennung, Abgasnachbehandlung	1683
13.4.3.4	Festigkeit, Lebensdauer	1686
13.4.3.5	Akustik	1689
13.4.3.6	Öl-/Kühlmittelkreisläufe, Kraftstoffsysteme	1691
13.4.3.7	Motorsimulation	1694
13.4.4	Fertigungsorientierte simulationsgestützte Bauteilentwicklung	1695
13.4.4.1	Toleranzmanagement	1696
13.4.4.2	Gießsimulation	1697
13.4.4.3	Einbau- und Montagesimulation	1699
13.5	Rapid Prototyping (RP)	1700
13.6	Wissensmanagement	1701
13.7	Infrastruktur der Informationstechnologie (IT)	1704
	<i>Verwendete Abkürzungen</i>	1705
	Literaturverzeichnis	1708
	Stichwortverzeichnis	1755

1 Merkmale und Besonderheiten von Verbrennungsmotoren im Zusammenhang mit der Anwendung als Antrieb von Maschinen bzw. Fahrzeugen

Im vorliegenden Buch werden wesentliche Probleme des Verbrennungsmotors vor allem im Hinblick auf dessen Anwendung zum Antrieb von Kraftfahrzeugen und die Konstruktion der Motoren behandelt. Dabei erscheint es hilfreich, sowohl von der Struktur der Fachdisziplin als auch von grundlegenden Zusammenhängen bei der Funktion und den Besonderheiten von Verbrennungsmotoren auszugehen.

Die Struktur der Fachdisziplin Verbrennungskraftmaschine lässt sich anhand des Bildes 1.1 in drei große Komplexe unterteilt darstellen. Die Reihenfolge der Komplexe folgt dem Hierarchie-Gedanken.

Die **Thermodynamik** ist die Theorie des Verbrennungsmotors. Sie steht für die Idee von der Gewinnung nutzbarer mechanischer Arbeit aus Wärmeenergie. Die Thermodynamik befasst sich maßgeblich mit den Kreisprozessen.

Das **Arbeitsverfahren** steht für das Management der Energieumwandlung im Motor. Dazu gehören im Wesentlichen Ladungswechsel, Gemischbildung und -aufbereitung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie die zu deren Optimierung erforderlichen Einrichtungen und Maßnahmen. Wegen der Anforderungen und der Kompliziertheit der Prozesse im Motor ist die Anwendung elektronischer Mess-, Steuer- und Regelungseinrichtungen inzwischen unverzichtbar geworden.

Die **Motormechanik** ist vor allem auf die bauliche Umsetzung zur Realisierung der Prozesse im Motor orientiert. Gegenstand sind insbesondere die Kinematik (Bewegungen) und Kinetik (Kraftwirkungen) sowie die funktionelle und belastungsgerechte Auslegung aller Motorteile und Baugruppen.

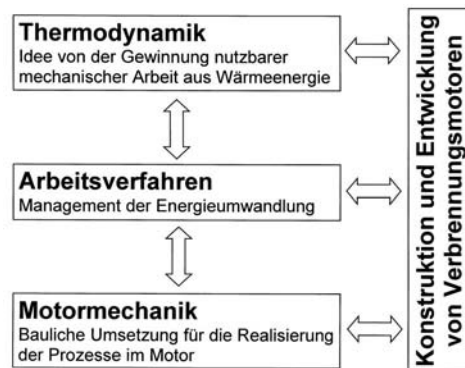


Bild 1.1
Hierarchie der Fachdisziplin
Verbrennungskraftmaschine

Bei der **Konstruktion und Entwicklung** eines Motors muss den Belangen aller drei dieser Komplexe Rechnung getragen werden. Und es ist jeder der drei Komplexe als gleich wichtig anzusehen. Es kann ein anspruchsvolleres Arbeitsverfahren nur dann umgesetzt werden, wenn die sich damit ergebenden Belastungen von der Motormechanik ertragen werden. Das macht es gleichzeitig notwendig, dass die Motormechanik nicht einfach im Sinn von «Das muss er können.» überfordert wird. Vielmehr muss die Motorentwicklung auf beiden «Baustellen» gleichzeitig und abgestimmt erfolgen, um den thermodynamischen Prozess bestmöglich realisieren zu können. So gesehen sind Konstruktion und Entwicklung die anspruchsvollsten und interessantesten Aufgaben, die beim Motorenbau zu vergeben sind.

Die Konstruktion spielt eine besondere Rolle im Entwicklungsprozess. Das ergibt sich daraus, dass in der Konstruktion die Produkte vom Beginn der Entwicklung bis zur Serienfreigabe und darüber hinaus in der Serienbetreuung sowie bis zum Recycling verfolgt werden. Alle anderen Bearbeiter wie in Versuch, Berechnung usw. sind an dem Entwicklungsprozess mehr oder weniger nur zeitweilig und begrenzt beteiligt. Die Entwicklungsverantwortung liegt deshalb generell bei der Konstruktion.

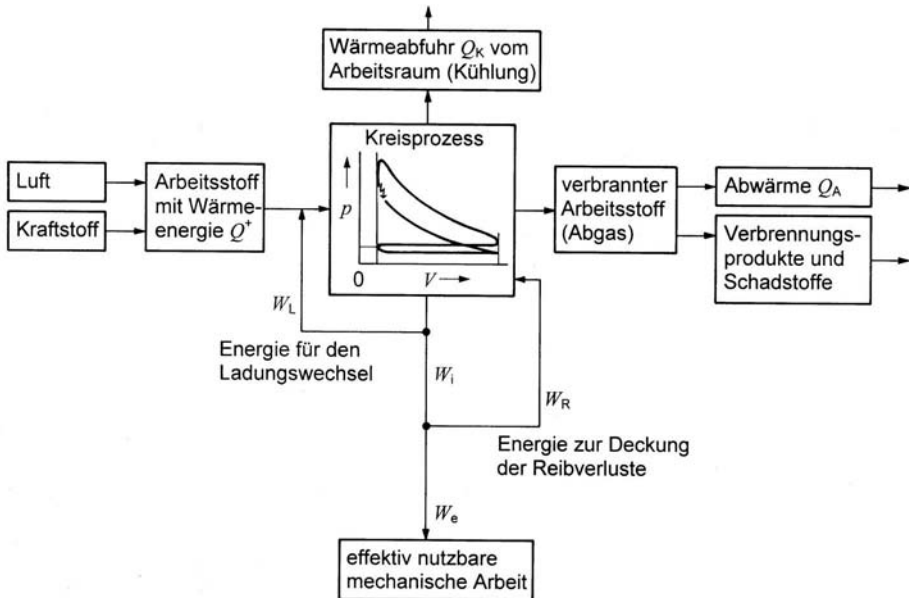


Bild 1.2 Stoff- und Energiefluss beim Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors

Alle Stoff- und Energieströme sowie die Wärmekraftmaschine Motor und deren Betriebsstoffe werden der Umwelt entnommen und gelangen in veränderter Form dahin zurück. Selbst die gewonnene mechanische Arbeit wird letztlich allein zur Veränderung der Umwelt in Form von Bewegung (bei Ortsveränderung, Transport, Produktion usw.) genutzt und dabei großenteils als Wärme (u.a. beim Bremsen) an die Umwelt zurückgeführt.

Die Gewinnung mechanischer Energie mit Wärmekraftmaschinen und deren Nutzung verändern und belasten die Umwelt!

Bemerkenswert ist, wie sich – bezogen auf den Stoff- und Energiefluss – technische und biologische Prozesse ähneln.

Die Behandlung der Problemstellungen des Verbrennungsmotors erfolgt in den folgenden Kapiteln weitgehend entsprechend dem Stoff- und Energiefluss beim Arbeitsprozess. Bild 1.2 stellt schematisch den Arbeitsprozess und die wesentlichen Zusammenhänge als Blockschema im Zusammenwirken mit der Umwelt dar.

Von maßgeblicher Bedeutung sind Verbrauch und Schadstoffemission beim Betrieb der Motoren. Der Verbrauch an Luft und Kraftstoff ist primär von der in Anspruch genommenen Leistung bestimmt. Unterschiede beim Wirkungsgrad von in der Regel nur wenigen Prozent sind trotz erheblicher Entwicklungsanstrengungen und zweifellos erreichter Erfolge weniger bedeutsam. Wollte man beispielsweise nur mit Verbesserung des Wirkungsgrades den minimalen Kraftstoffverbrauch eines Dieselmotors auf $\frac{1}{3}$ verringern, müsste der Wirkungsgrad von etwa 0,4 auf das Dreifache = 1,2! vergrößert werden – was schlechterdings unmöglich ist. Das Sparpotential mit Verbesserungen beim Wirkungsgrad der Motoren ist begrenzt. Dazu kommt noch, dass Anstrengungen zur Reinhaltung der Luft vielfach mit einem merklichen Mehr beim Verbrauch einhergehen. Das macht es notwendig, Einsparpotential auf jede erdenkliche Weise auszunutzen. Wichtige Ansätze bestehen neben den Motoren am Fahrzeug mit Maßnahmen zur Verringerung der benötigten Antriebsleistung bei

- Verbesserung des Wirkungsgrades im Antriebsstrang,
- geringerer Fahrzeugmasse,
- weniger Luft- und Fahrwiderstand; das schließt auch
- vernünftige Fahrgeschwindigkeiten ein!

Und es besteht erhebliches Potential bei der Verkehrsorganisation. Übermäßige Regulierung des Verkehrs mit schlecht abgestimmten Ampeln bis hin zu oft beobachtbarer «Organisation roter Wellen» machen Maßnahmen an Motor und Fahrzeug zur Verringerung des Verbrauchs und der Schadstoffbelastung weitgehend zunichte. Inzwischen hat auch der Verkehrslärm beängstigende Ausmaße angenommen.

Da einerseits die Energieressourcen für Kraftstoffe in Form von Erdöl nicht unerschöpflich sind und andererseits Forderungen nach immer mehr Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge erhoben werden, sind Alternativen und bessere Effizienz möglichst kurzfristig unabdingbar. Aus dieser Situation heraus werden vermehrt Anstrengungen zur Realisierung von Elektroantrieben bei Kraftfahrzeugen unternommen. Erste Serienfahrzeuge sind auf dem Markt [1.4]. Wesentliche Vorteile bestehen in der Möglichkeit, örtlich ohne Schadstoffemission zu fahren und weniger Geräusentwicklung zu erreichen. Es stellt sich die Frage, warum die Anwendung von Elektroantrieben bei Kraftfahrzeugen ein so schwieriges Vorhaben ist und weshalb meist nur Fahrstrecken um etwa 100 km mit einer Batterieladung zu realisieren sind. Ein Vergleich des massebezogenen Energieinhalts verfügbarer Batterien und flüssiger Kraftstoffe macht das Problem deutlich (Bild 1.3).

Alle alternativen Energieträger haben auf die Masse bezogen wesentlich weniger Energieinhalt als flüssige Kraftstoffe. Selbst mit einer neuartigen Lithium-Luft-Batterie [1.2] beträgt der massebezogene Energieinhalt nur etwa 8,4% vom Energieinhalt des Dieselmotorkraftstoffs. Und in der Mehrzahl der in Bild 1.3 aufgenommenen alternativen Energieträger ist es noch viel weniger. Die Frage ist wieder, warum das so ist und

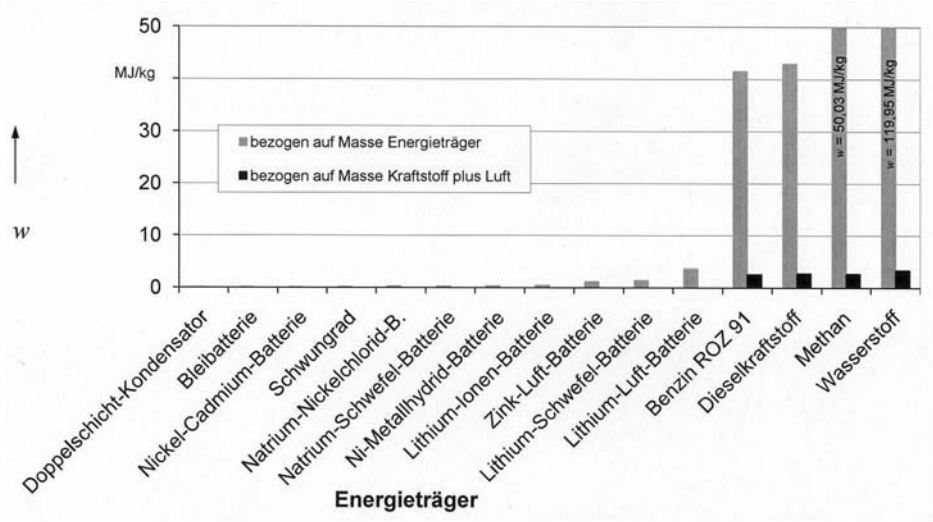


Bild 1.3 Spezifischer Energieinhalt einiger Energieträger bzw. von Energiespeichern (s. Tabelle 2.3 und [1.1 bis 1.3])

ob es nicht doch Batterien – eigentlich sind es strenggenommen Akkumulatoren – zu finden gibt, mit denen dieses Manko auszugleichen wäre? Die wesentliche Antwort auf diese Frage ergibt sich aus einem entscheidenden Vorteil der Verbrennungsmotoren, der diese geradezu prädestiniert für die Anwendung als Kraftfahrzeugantrieb erscheinen lässt. Es ist die Besonderheit, dass auf der Erde bei den Verbrennungsmotoren nur der Kraftstoff im Tank des Fahrzeugs mitgeführt werden muss. Bei einem Masseverhältnis von etwa 14,7 kg Luft zur Verbrennung von 1 kg flüssiger Kraftstoff muss im herkömmlichen Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor nur etwa 6,8% der insgesamt für die Energiefreisetzung erforderlichen Stoffmasse mitgeführt werden. Erfolgt dagegen der Bezug des Energieinhalts auf die gesamte erforderliche Masse Kraftstoff plus Luft, zeigen sich wesentlich ausgeglichene Verhältnisse. Danach wäre der Energieinhalt mit einer Lithium-Luft-Batterie sogar etwas besser als der von Diesekraftstoff zusammen mit der für die Verbrennung nötigen Luftmasse (Bild 1.3). Und auch bei den sehr großen Energieinhalten von Methan und Wasserstoff ergeben sich keine besseren Verhältnisse. Das liegt daran: Je größer der Energieinhalt der Kraftstoffe ist, umso mehr Luft wird zur Verbrennung benötigt (vgl. Kapitel 4). Das bedeutet:

Was für den Elektroantrieb im Kraftfahrzeug die «mitfahrende Steckdose» wäre, das ist für den Verbrennungsmotor die freie Verfügbarkeit der Luft aus der Umwelt.

Bei notwendiger Speicherung der Luft im Fahrzeug ergäbe sich für den Tankinhalt eines Mittelklasse-Pkw eine negative Nutzmasse! So betrachtet ist auf absehbare Zeit kaum zu erwarten, dass Energieträger gefunden werden könnten, mit denen der Vor-

teil der freien Verfügbarkeit von Luft aus der Atmosphäre auszugleichen ist. Die beschränkte Reichweite der Elektroantriebe mit Fahrbatterie ist ein prinzipieller Nachteil. Nur die Brennstoffzelle kann als günstige Alternative für die direkte Energiegewinnung an Bord von Fahrzeugen angesehen werden – aber bei dieser wird ebenso wie bei den Verbrennungsmotoren die Luft aus der Atmosphäre genutzt [1.5; 1.6]. Letztlich folgt daraus, dass bei Verbrennungsprozessen und bei der Energiegewinnung im Motor die Luft von mindestens ebensolcher Bedeutung ist wie der Kraftstoff.

Es gibt noch einen weiteren Aspekt, der als wesentlicher Vorteil zugunsten des Verbrennungsmotors anzurechnen ist. Das ist die Problematik der Sicherheit. Das liegt daran, dass die für die Energiegewinnung in den Brennraum des Verbrennungsmotors einzubringende Kraftstoffmenge z.B. bei Pkw mit etwa 50 mm³ Kraftstoff je Arbeitspiel sehr klein ist. Bei einem Elektroantrieb mit Fahrbatterie und Betriebsspannungen um 0,5 kV und mehr(!) [1.4] ist dagegen immer die gesamte im Speicher enthaltene Energiemenge «aktiv». Das bedeutet für den Schadenfall ein erhebliches Risiko. Der Kraftstoff im Tank ist dagegen ähnlich ungefährlich wie eine ungeladene Batterie – und das, obwohl der Energieinhalt einer Tankfüllung von 50 kg Benzin etwa der Wärmeenergie von 475 kg Dynamit entspricht!

Für elektrische Fahrentriebe bis hin zu Hybridfahrzeugen unterschiedlichster Konzeption sind neben den technischen Problemen bei der Installation eines zweiten Antriebssystems gänzlich anderer Art insbesondere auch noch Sicherheitsprobleme viel größerer Brisanz als bei herkömmlichen Antrieben mit Verbrennungsmotoren zu lösen. Und es ist nicht abzusehen, dass der prinzipbedingte Vorteil der freien Verfügbarkeit von Luft aus der Atmosphäre für die Verbrennungsmotoren mit elektrischen Speichermedien jemals ausgeglichen werden könnte. Aus dieser Sicht ist das Zusammenwirken von Verbrennungsmotor und Elektroantrieb weniger als Konkurrenz denn vielmehr als «strategische Partnerschaft» anzusehen. Fazit ist, Verbrennungsmotoren werden noch lange Zeit als Hauptantrieb oder so genannte Range Extender – «neudeutsch» für Reichweitenverlängerer, ein kleiner Verbrennungsmotor zum Nachladen der Fahrbatterie im Fahrzeug – ihre maßgebliche Bedeutung für den Antrieb von Kraftfahrzeugen behalten.

Um den Ausführungen im vorliegenden Buch besser folgen zu können, soll vorab noch auf einige teils einfache, aber grundlegende Zusammenhänge und wichtige Begriffe eingegangen werden. Ganz entscheidend ist der korrekte Umgang mit den Größen Energie bzw. Arbeit und Leistung. Zum einen leitet sich daraus der Begriff Wirkungsgrad als das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand ab. Der Wirkungsgrad η steht für die Effizienz des Prozesses zur Gewinnung mechanischer Energie im Motor. Es ist

$$\eta = \frac{W_e}{Q_{zu}} = \frac{P_e}{Q_{zu}} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Dabei ist W_e die nach Umwandlung mit dem Kreisprozess am Schwungrad verfügbare mechanische Energie bzw. Arbeit und Q_{zu} (= Q^+) die mit dem Arbeitsstoff zugeführte Wärmeenergie. Beides sind absolute Größen. Sie sind auf ein Arbeitsspiel – zwei

oder vier Takte, je nach Arbeitsweise des Motors – bezogen. Gleichmaßen kann der Wirkungsgrad aber auch aus dem Verhältnis von am Schwungrad abgegebener Motorleistung P_e und zugeführtem Wärmestrom \dot{Q}_{zu} gebildet werden. Wirkungsgrade sind stets auf den Ausgangspunkt der Energieumwandlungskette bezogen. Das ist die zugeführte Wärme Q_{zu} bzw. der zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_{zu} . Der wesentliche Unterschied zwischen Energie bzw. Arbeit und Leistung besteht darin, dass allein die Leistung einen Zeitbezug hat. Das macht die Universalität des Leistungsbegriffs aus. Zum anderen muss gerade deshalb streng zwischen den Begriffen Energie bzw. Arbeit und Leistung unterschieden werden. Und das ist deshalb häufig etwas problematisch, weil in einfachster Weise gilt:

$$W = F \cdot s \quad (\text{Gl. 1.2})$$

und

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v \quad (\text{Gl. 1.3})$$

Das sind die grundlegenden Beziehungen zur Berechnung einer Verschiebearbeit und der zur Verrichtung der Arbeit in einer bestimmten Zeitdauer erforderlichen Leistung. Leistung ist die je Zeiteinheit aufgewendete Energie bzw. verrichtete Arbeit. Gl. 1.3 führt zu beachtlichen Konsequenzen. So ist zum einen bei einer gegebenen Fahrwiderstandskraft F die aufzubringende Leistung P umso größer, je schneller gefahren werden soll. Im Extremfall $v \rightarrow \infty$ wird auch die Leistung und damit der zeitliche Kraftstoffverbrauch theoretisch unendlich groß! Zum anderen bedeutet der Faktor v für die Geschwindigkeit, dass Schaltvorgänge – wie beispielsweise bei variablen Ventiltrieben notwendig – nicht innerhalb eines Zeitfensters $dt \rightarrow 0$ ausgeführt werden können. Das ist so, weil eine Geschwindigkeit $v \rightarrow \infty$ für den Zeitmoment unendlich viel Leistung erfordern würde. Es erstaunt bei Nachrechnungen oft, wie groß die für schnell ablaufende Vorgänge aufzubringenden Leistungen sind. Letztlich resultiert aus der Leistungsgleichung sowohl eine Beschränkung der erreichbaren Fahrgeschwindigkeit als auch bei Schaltvorgängen der Drehzahl, bis zu der diese realisiert werden können.

Die Eigenschaften eines Motors werden gewöhnlich mit Kennlinien bzw. für den gesamten Betriebsbereich als Kennlinienschar in Form von sog. Motorkennfeldern als Drehmoment bzw. Kreisprozessarbeit in Abhängigkeit von der Drehzahl dargestellt. Darin können mit Parameterlinien eine Vielzahl weiterer Informationen z.B. zum Wirkungsgrad, zum Kraftstoffverbrauch, zur Schadstoffemission usw. enthalten sein (vgl. auch Bild 2.26).

In Bild 1.4 sind Kennlinien des Motordrehmoments M_d in Abhängigkeit von der Drehzahl n dargestellt. Die an der Abszisse angetragene Drehzahl steht für die Drehgeschwindigkeit Kurbelwelle bzw. unter Einrechnung der Übersetzung des Triebstrangs und des Rollhalbmessers am Rad für die Fahrgeschwindigkeit. Das an der Ordinate angetragene Drehmoment steht für die Zugkraft am Kurbelradius bzw. am Radius des Schwungrads und ergibt unter Einrechnung der Triebstrangübersetzung und

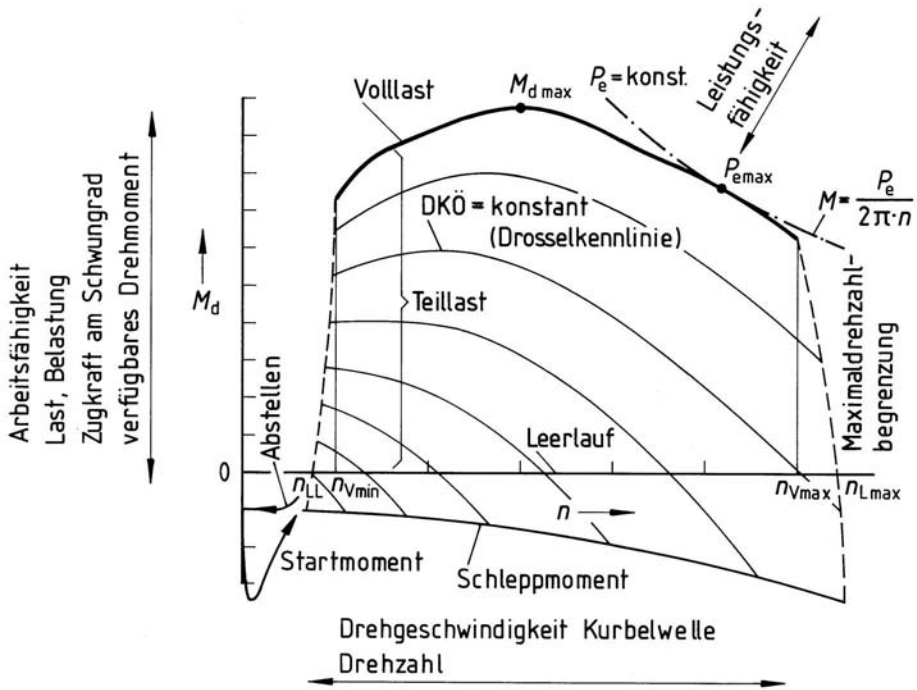


Bild 1.4 Betriebskennlinien und Betriebsbereiche bzw. Kennfeld und Begriffe bei Verbrennungsmotoren

des Rollhalbmessers die Zugkraft am Fahrzeug. Mit der zu Gl. 1.2 analogen Beziehung

$$W = M \cdot 2\pi \tag{Gl. 1.4}$$

folgt die Arbeit W bei Drehbewegung. Mit dem Faktor 2π wird die Arbeit berechnet, die ein Drehmoment M bei einer vollständigen Umdrehung einer Welle verrichtet.

Es entspricht das Drehmoment an der Ordinate in Bild 1.4 der Arbeitsfähigkeit des Motors – auch bezeichnet mit dem Begriff Last bzw. Belastung. Die Begriffe Drehmoment und Last bzw. Arbeitsfähigkeit sind ausschließlich in Ordinatendichtung anzuwenden. Der Begriff Last bzw. Belastung ist ohne Bezug zur Drehzahl. Er dient nur zur Bezeichnung der Arbeitsfähigkeit bzw. des Drehmoments. Der Begriff Drehzahl bzw. Drehgeschwindigkeit ist ausschließlich in Richtung der Abszisse orientiert.

Die Leistung ist für beliebige Betriebspunkte zu berechnen mit

$$P = M_d \cdot 2\pi \cdot n \tag{Gl. 1.5}$$

Allein die Leistung enthält mit dem Drehzahleinfluss einen zeitlichen Bezug.

Mit Umstellen der Gl. 1.5 können alle Punkte im Betriebsbereich des Motors, die derselben Leistung entsprechen, als Linienzug dargestellt werden. Es sind Linien

gleicher Leistung («Gleichleistungs-Hyperbeln» – Hyperbeln schneiden die Achsen nicht!) zu berechnen mit

$$M_d = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (\text{Gl. 1.6})$$

An den Schnittpunkten der Motorkennlinien mit den Gleichleistungshyperbeln kann die im Betriebspunkt abgegebene bzw. aufgenommene Leistung unmittelbar abgelesen werden. Die Leistungsfähigkeit eines Motors nimmt ausgehend von einem bestimmten Betriebspunkt sowohl in Richtung zu mehr Drehmoment als auch in Richtung zu mehr Drehzahl zu. Der Begriff Leistungsfähigkeit erstreckt sich deshalb quer über die Leistungshyperbeln.

Eingetragen in Bild 1.4 ist die sog. Volllastkennlinie des Motors. Volllast ist das bei der jeweiligen Drehzahl größte erzielbare Drehmoment bzw. die größte Arbeitsfähigkeit, die von einem Motor erhalten werden kann. Daneben sind für Drosselklappenöffnungen DKÖ = konstant sog. natürliche bzw. Drosselkennlinien eingetragen, wie sie bei Ottomotoren je nach Stellung des Bedienhebels gemessen werden können. Der gesamte Betriebsbereich eines Motors erstreckt sich in Ordinatenrichtung von Volllast bis zum sog. Schlepptomente des Motors. Das Schlepptomente ist aufzubringen, um den Motor – ohne dass eine Verbrennung erfolgt (z.B. im Schubtrieb bei Gefällefahrt) – auf Drehzahl halten zu können. Wird der Motor bei offener Drosselklappe geschleppt, entspricht das Schlep- bzw. Schubmoment in guter Näherung dem Reibverlustmoment. Der Betriebsbereich zwischen Volllast und Abszisse (Drehzahlachse) wird als Teillast bezeichnet. Der Bereich zwischen Abszisse und Schlepplinie ist der Schlepptbereich. Auf der Abszisse sind das abgegebene Drehmoment bzw. die Nutzarbeit des Motors null. Der Motor befindet sich über die gesamte Abszisse im Leerlaufzustand. Im Leerlauf entsteht – neben den Verbrennungsprodukten – ausschließlich Abwärme. Die mit dem Kraftstoff zugeführte Energie reicht gerade so aus, die Energie für Wärmeverluste, das Durchpumpen von Ladung durch den Motor beim Ladungswechsel und die Überwindung der Reibung im Triebwerk aufzubringen. Ausschließlich Drehmomente größer null können vom Schwungrad abgenommen und für den Antrieb von Maschinen oder Fahrzeugen genutzt werden. Das am Schwungrad verfügbare Drehmoment M_d wird deshalb als effektiv nutzbares Drehmoment M_e bezeichnet. Das effektive Drehmoment $M_d = M_e$ entspricht gerade der während eines Kreisprozesses aus der Verbrennung und Energieumwandlung gewonnenen effektiven Kreisprozessarbeit W_e . Es ist bei Hubkolbenverbrennungsmotoren:

$$M_d = M_e = \frac{W_e}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{T_U}{T_A} \quad (\text{Gl. 1.7})$$

Mit dem Verhältnis aus Taktzahl je Umdrehung T_U zu Taktzahl je Arbeitsspiel T_A wird berücksichtigt, dass bei Zweitaktmotoren ein vollständiges Arbeitsspiel während einer Umdrehung der Kurbelwelle (2 Takte) abläuft, während beim Viertaktverfahren dazu 2 Umdrehungen der Kurbelwelle (4 Takte) erforderlich sind. Das bedeutet, dass bei gleicher Kreisprozessarbeit W_e das Drehmoment des Viertaktmotors nur halb so groß

ist wie das des Zweitaktmotors. Weil mit dem während eines Arbeitsspiels vom Schwungrad abgenommenen effektiven Drehmoment $M_d = M_e$ die Kreisprozessarbeit W_e vollständig aufgebraucht ist, muss der Kreisprozess zur dauernden Energiegewinnung beständig wiederholt werden. Die effektiv nutzbare Leistung ist

$$P_e = \frac{W_e}{t} = W_e \cdot n_A = W_e \cdot n \cdot \frac{T_U}{T_A} = M_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = M_d \cdot \omega \quad (\text{Gl. 1.8})$$

Das Drehmomentmaximum entspricht der größten Arbeitsfähigkeit eines Motors. Es tritt bei der Drehzahl $n_{M_d \max}$ an der Volllastkennlinie auf. Die maximale Leistung wird ebenfalls an der Volllastkennlinie erreicht, allerdings in der Regel bei größerer Drehzahl $n_{P_e \max}$ (sog. «Nenn Drehzahl»). Die Drehzahlen, bei denen ein Verbrennungsmotor das größte Drehmoment und die größte Leistung abgibt, sind gewöhnlich nicht identisch. Es ist bei Fahrzeugmotoren die Drehzahl $n_{P_e \max}$ bis zu etwa 30% größer als $n_{M_d \max}$. Die größte zulässige Drehzahl (Maximaldrehzahl) ist bestimmt von der

- Festigkeit der Motorbauteile, der
- Funktionssicherheit der Teile und Einrichtungen (insbes. Ventiltrieb) und der
- thermischen Belastung (diese nimmt mit der Leistung zu).

Um den Motor vor Schäden infolge Überdrehzahl zu schützen, wird vielfach eine Maximaldrehzahlbegrenzung vorgesehen.

Funktionelle Besonderheiten von Verbrennungsmotoren bestehen darin,

- bei der Drehzahl Null kein Drehmoment abzugeben. Das kommt daher, dass bei stehendem Motor kein Kreisprozess – und damit auch kein Ladungswechsel – ausgeführt werden kann.
- Bei Verbrennungsmotoren ist erst ab einer Drehzahl größer als die Leerlaufdrehzahl ein Nutzdrehmoment am Schwungrad verfügbar. Das liegt daran, dass dem Motor zur Durchführung des Kreisprozesses Energie vom Schwungrad zugeführt werden muss. Erst bei Drehzahlen größer Leerlaufdrehzahl ist ein Nutzdrehmoment vom Schwungrad abnehmbar.
- Ein Verbrennungsmotor muss gestartet und auf Betriebsdrehzahl größer Leerlaufdrehzahl gebracht werden. Das Starten erfolgt entweder mit Druckluft auf nach dem Arbeitstotpunkt stehende Kolben oder mit einem Anlassmotor (Starter), der meist am Schwungrad angreift. Auch manuelles «Anwerfen» wird ausgeführt.
- Gestartet wird entweder nur der Motor oder der Motor zusammen mit Maschine. Bei separatem Start des Motors muss die Maschine, wie bei Fahrzeugen üblich, mit einer Anfahrkupplung auf Betriebsdrehzahl gebracht werden.
Zum Anhalten des Motors genügt das Absperren der Kraftstoffzufuhr oder «Zündung aus».

Die Anwendung eines Verbrennungsmotors als Antriebsmaschine erfordert eine Anpassung der charakteristischen Eigenschaften von Motor und Maschine bzw. Fahrzeug. Im einfachsten Fall sind die Wellen von Motor und Maschine direkt verbunden (Bild 1.5).

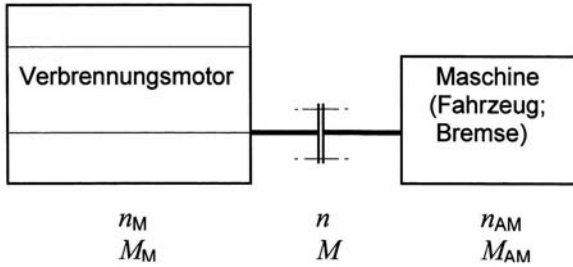


Bild 1.5 Motor und Maschine bei Direktkopplung

Die Wellen von Motor und Maschine sind bei Direktkopplung unmittelbar mit einer nicht schaltbaren Kupplung und ohne dass ein Getriebe vorgesehen ist verbunden. Direktkopplung ist beispielsweise bei einigen Handarbeitsgeräten ausgeführt.

Die Auswahl des Motors für eine Arbeitsmaschine bzw. ein Fahrzeug muss bei Direktkopplung so erfolgen, dass

- Arbeitsfähigkeit Motor \geq Bedarf der Maschine und
- Betriebsdrehzahlbereich Motor \geq vorgesehener Drehzahlbereich der Maschine

sind. Die Drehzahl n_M der Kurbelwelle des Motors ist bei Direktkopplung genauso groß wie die Drehzahl n_{AM} der Eingangswelle Maschine:

$$n_M = n_{AM} = n \tag{Gl. 1.9}$$

Bei konstanter Drehzahl n ist das vom Motor abgegebene Drehmoment M_M genauso groß wie das Drehmoment M_{AM} an der Welle der Maschine

$$M_M = M_{AM} = M \quad (\text{gilt für } n = \text{konstant!}) \tag{Gl. 1.10}$$

Mit Kennungswandlern (Getriebe) im Triebstrang kann eine Anpassung der Betriebsbereiche erfolgen. Dazu muss die Leistung des Motors größer sein als der Leistungsbedarf der Maschine bzw. des Fahrzeugs. Ggf. müssen die Maximaldrehzahlen zum Vermeiden von Schäden begrenzt werden!

Die Kennlinien von Motor und Maschine schneiden sich in Arbeitspunkten. An diesen Stellen sind die Bedingungen nach den Gln. 1.9 und 1.10 erfüllt. Trotzdem muss ein dauerhafter Betrieb bei der Drehzahl eines Arbeitspunktes nicht unbedingt möglich sein. Das liegt daran, dass ein vom Motor abgegebenes bzw. von der Maschine aufgenommenes Drehmoment immer in einem, wenn meist auch sehr kleinen, Maß veränderlich ist. Die Verhältnisse können anhand des Bildes 1.6 geklärt werden.

Entscheidend dafür, ob eine eingestellte Drehzahl über lange Betriebsdauer konstant bleibt, sind die Anstiege der Motor- und der Maschinenkennlinie im Arbeitspunkt. Nimmt z.B. das Motordrehmoment mit größerer Drehzahl, ausgehend vom Arbeitspunkt, mehr zu als das Drehmoment der Widerstandslinie, entsteht ein Drehmomentüberschuss. Der Motor beschleunigt umso mehr, je mehr der Drehmomentüberschuss zunimmt. Andernfalls, wenn z.B. der Drehmomentbedarf der Maschine im Arbeitspunkt nur um ein geringes Maß größer wird als das Motordrehmoment, entsteht ein

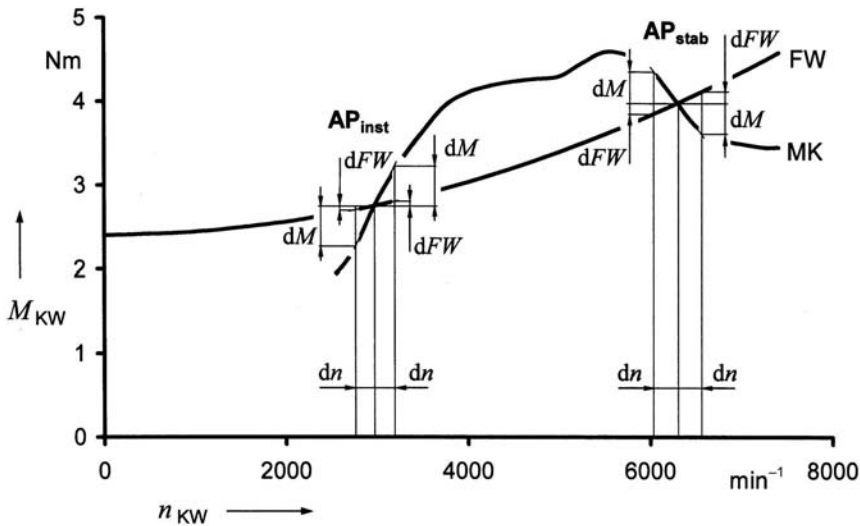


Bild 1.6 Kennlinien von Motor und Maschine bzw. Fahrzeug – Stabilitätsbedingungen
 Dargestellt ist die Drehmomentkennlinie eines Zweitaktmotors M53/1 KFR ($V_h = 49,6 \text{ cm}^3$) und die Fahrwiderstandskennlinie eines Kleinrollers für Fahrt im 3. Gang auf einer Steigung von 1,5% mit zulässiger Gesamtmasse $m_{\text{ges}} = 230 \text{ kg}$

MK – Motorkennlinie

FW – Fahrwiderstandskennlinie

AP – Arbeitspunkte – Schnittpunkte von Motor- und Widerstandskennlinie

Drehmomentmanko. Es tritt eine Verzögerung ein, die Drehzahl nimmt ab und das umso mehr, je größer das Manko wird. Im Extremfall geht der Motor schnell aus. Er wird «abgewürgt». Das bedeutet, der beabsichtigte Arbeitspunkt kann nicht eingestellt und auf Dauer beibehalten werden. Ein Arbeitspunkt mit solch charakteristischer Eigenschaft wird als instabil bezeichnet. In Bild 1.6 ist das der Punkt AP_{inst} . Mathematisch ist die Bedingung für das Vorliegen eines instabilen Arbeitspunktes

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dFW}{dn} \quad (\text{Gl. 1.11})$$

Anders sind die Verhältnisse, wenn der Anstieg der Widerstandskennlinie in einem Arbeitspunkt größer ist als der Anstieg der Motorkennlinie. Nimmt z.B. der Drehmomentbedarf der Maschine um ein Geringes ab, so nimmt die Drehzahl um ein kleines Maß zu, bis wieder Drehmomentgleichgewicht vorliegt und die Bedingung nach Gl. 1.10 erfüllt ist. Nimmt dagegen der Drehmomentbedarf der Maschine etwas zu, dann nimmt die Drehzahl geringfügig ab, bis die Bedingung nach Gl. 1.10 ebenfalls wieder erfüllt ist. Ganz gleich sind die Verhältnisse, wenn sich das Motordrehmoment ändert. Ein Arbeitspunkt mit solch charakteristischer Eigenschaft wird als stabil bezeichnet. Stabile Betriebsweise liegt vor, wenn bei einer Änderung der Motorbelastung nur eine sehr kleine Veränderung der Drehzahl eintritt bzw. die Drehzahl konstant bleibt. In

Bild 1.6 ist das der Punkt AP_{stab} . Mathematisch ist die Bedingung für das Vorliegen eines stabilen Arbeitspunktes

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dFW}{dn} \quad (\text{Gl. 1.12})$$

Die beste Stabilität liegt vor, wenn neben der Bedingung Gl. 1.12 die Kennlinien von Motor und Maschine im Arbeitspunkt etwa orthogonal zueinander gerichtet sind.

Motor und Maschine bzw. Fahrzeug können bei instabilem Arbeitspunkt nur dann dauerhaft mit gleich bleibender Drehzahl betrieben werden, wenn ständig nachgeregelt wird. Das wiederum bedeutet nichts Anderes, als dass die Drehmomentkennlinien so verändert werden, dass die Bedingung nach Gl. 1.12 erfüllt und der sonst instabile in einen stabilen Arbeitspunkt umgewandelt wird. Elektrische Maschinen sind für diesen Zweck besonders gut geeignet. Bei diesen können mittels Regelung Kennlinien $n = \text{konstant}$ realisiert und je nach Vorgabe auf eine bestimmte Drehzahl eingestellt werden. Damit ist drehzahlstabiler Motorbetrieb bei allen Drehzahlen unabhängig vom Verlauf einer Motorkennlinie möglich (Bild 1.7).

Mit Anordnungen wie in Bild 1.5 schematisch dargestellt können Prüfstände zur Untersuchung der Betriebseigenschaften von Verbrennungsmotoren aufgebaut werden (Bild 1.8).

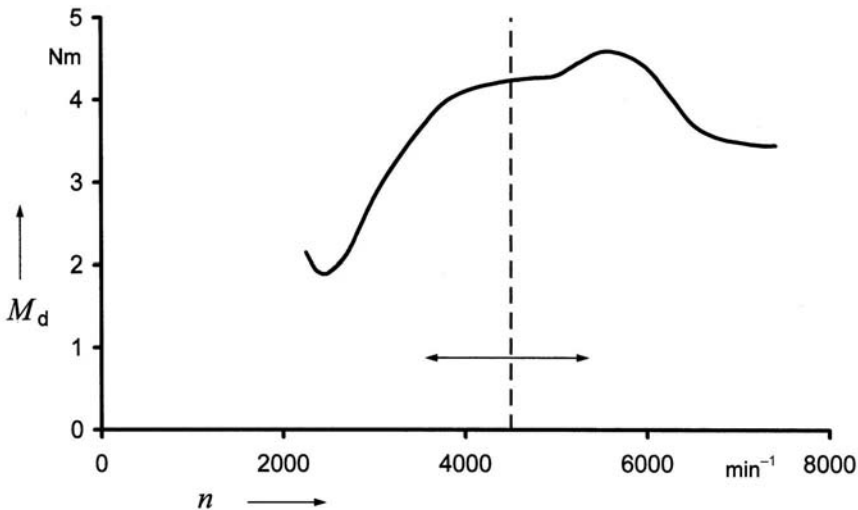


Bild 1.7 Motorkennlinie und Kennlinie einer drehzahlgeregelten Maschine

— Motorkennlinie

- - - Kennlinie einer drehzahlgeregelten Maschine (elektrische Bremse)

↔ Drehzahlverstellung Bremsvorrichtung

Mit der je nach Vorgabe einstellbaren drehzahlgeregelten Maschinenkennlinie kann stabiler Betrieb bei jeder Drehzahl im Betriebsbereich eines Motors realisiert werden.