

Definition und Einteilung der Hubkolbenmotoren

Dr.-Ing. Hanns-Erhard Heinze, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Helmut Tschöke

- 2.1 Definitionen – 10**
- 2.2 Möglichkeiten der Einteilung – 10**
 - 2.2.1 Verbrennungsverfahren – 10
 - 2.2.2 Kraftstoff – 11
 - 2.2.3 Arbeitsverfahren – 12
 - 2.2.4 Gemischbildung – 12
 - 2.2.5 Ladungswechselsteuerung – 12
 - 2.2.6 Ladungseinbringung – 13
 - 2.2.7 Bauform – 13
 - 2.2.8 Zündung – 15
 - 2.2.9 Kühlung – 15
 - 2.2.10 Lastregelung – 15
 - 2.2.11 Einsatzzweck – 15
 - 2.2.12 Drehzahl- und Leistungsabstufung – 16
- Literatur – 16**

2.1 Definitionen

Kolbenmaschinen sind Maschinen, in denen die Energie eines Fluids (Gas oder Flüssigkeit) auf einen bewegten Verdränger (zum Beispiel einen Kolben) oder von dem Verdränger auf das Fluid übertragen wird [1–3]. Sie gehören damit zu den Fluidenergiemaschinen, die als Arbeitsmaschinen mechanische Energie aufnehmen, um die Energie des geförderten Fluids zu erhöhen. Dagegen wird bei Kraftmaschinen mechanische Energie als Nutzarbeit am Kolben beziehungsweise am Kurbeltrieb freigesetzt.

Für die Arbeitsweise von Kolbenmaschinen ist charakteristisch, dass durch die Bewegung des Verdrängers (Kolbens) ein sich periodisch verändernder Arbeitsraum entsteht. Abhängig von der Art der Bewegung des Verdrängers unterscheidet man zwischen Hub- und Rotationsverdrängermaschinen. Bei Hubkolbenmaschinen bewegt sich als Verdränger ein zylindrischer Kolben in einem Zylinder zwischen zwei Endlagen, den Totpunkten. Der Begriff „Kolben“ wird oft auch auf nichtzylinderförmige Verdränger angewendet. Bei den Rotationskolbenmaschinen bewirkt üblicherweise ein rotierender Verdränger die Veränderung des Arbeitsraumes.

Verbrennungskraftmaschinen sind Maschinen, bei denen durch die Verbrennung eines zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemisches chemische in mechanische Energie umgesetzt wird. Die bekanntesten Verbrennungskraftmaschinen sind Verbrennungsmotoren und Gasturbinen. Einen Überblick gibt ■ Abb. 2.1.

Verbrennungsmotoren sind Kolbenmaschinen. Je nach Ausbildung des gasdichten, veränderlichen Arbeitsraums beziehungsweise nach der Kolbenbewegung werden **Hubkolbenmotoren** [5] (mit oszillierender Kolbenbewegung) und Rotationskolbenmotoren (mit rotierender Kolbenbewegung) unterschieden. Die Rotationskolbenmotoren wiederum werden eingeteilt in Drehkolbenmotoren (mit Innen- und Außenläufer mit reiner Drehbewegung um feste Achsen) und in Kreiskolbenmotoren (mit einem Innenläufer, dessen Achse eine Kreisbewegung ausführt) [6]. ■ Abb. 2.2 zeigt die unterschiedlichen Wirkprinzipien. Nur der Wankelmotor, ein Kreiskolbenmotor, hat Bedeutung erlangt.

Nach Art der Prozessführung unterscheidet man weiterhin zwischen Verbrennungsmotoren mit innerer und mit äußerer Verbrennung. Bei Motoren mit innerer Verbrennung ist das Arbeitsmedium (Luft) zugleich Träger des für die Verbrennung erforderlichen Sauerstoffs. Durch die Verbrennung des zugeführten Kraftstoffes entsteht Abgas, das in einem Ladungswechsel vor jedem Arbeitsspiel durch Frischladung ersetzt

werden muss. Die Verbrennung erfolgt daher zyklisch, wobei je nach Verbrennungsverfahren zwischen Otto-, Diesel- und Hybridmotoren unterschieden wird.

Bei Motoren mit äußerer Verbrennung (zum Beispiel Stirlingmotor) wird die außerhalb des Arbeitsraumes durch kontinuierliche Verbrennung entstehende Wärme auf das Arbeitsmedium übertragen. Damit ist ein Arbeitsprozess mit geschlossenem Kreislauf und nahezu beliebigem Kraftstoff möglich.

Im Weiteren werden nur Hubkolbenmotoren mit innerer, zyklischer Verbrennung betrachtet.

2.2 Möglichkeiten der Einteilung

Die Möglichkeiten der Einteilung von Hubkolbenmotoren sind auf Grund der komplexen Zusammenhänge sehr vielfältig. Hubkolbenmotoren mit innerer Verbrennung [7] kann man unterscheiden nach:

- Verbrennungsverfahren,
- Kraftstoff,
- Arbeitsverfahren,
- Gemischbildung/Kraftstoffeinbringung,
- Ladungswechselsteuerung,
- Ladungseinbringung,
- Bauform.

Weitere Unterscheidungsmerkmale können sein [8, 9]:

- Zündung,
- Kühlung,
- Lastregelung,
- Einsatzzweck,
- Drehzahl- und Leistungsabstufung.

Einige Einteilungsmerkmale sind heute nur noch von historischer Bedeutung.

2.2.1 Verbrennungsverfahren

Nach dem Verbrennungsverfahren wird vorrangig zwischen dem Ottoverfahren und dem Dieselverfahren unterschieden. Hybridmotoren weisen Merkmale sowohl des Otto- als auch des Dieselfahrens auf, sie sind nicht mit den Hybridantrieben zu verwechseln.

Der Ottomotor [10] ist ein Verbrennungsmotor, bei dem die Verbrennung des verdichteten Kraftstoff-Luft-Gemisches durch zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird. Dagegen entzündet sich beim Dieselmotor [11] der in den Verbrennungsraum eingespritzte flüssige Kraftstoff an der Luftladung, nachdem diese vorher durch Verdichtung auf eine für die

- Gicht-, Biogas (Klär-, Deponiegas), Wasserstoff (auch flüssig speicherbar)
- Flüssige Kraftstoffe:
 - Leichtkraftstoffe: Benzin, Kerosin, Benzol, Alkohole (Methanol, Ethanol, Butanol), Aceton, Ether, verflüssigte Gase (LNG, LPG, DME)
 - Schwerkraftstoffe: Petroleum, Gasöl (Dieselkraftstoff), Fettsäure-Methyl-Ester (FAME) vorrangig in Europa Raps-Methyl-Ester (RME, auch als Biodiesel bezeichnet), Pflanzenöle, Schweröle, Marine Fuel Oil (MFO), Biokraftstoffe der 2. und 3. Generation, hydrierte Pflanzenöle (HVO), Gas-to-liquid
 - Mischkraftstoffe: Diesel – RME, Diesel – Wasser, Diesel – Alkohol, Benzin – Alkohol, Benzin – Diesel
- Feste Kraftstoffe: Kohlenstaub, Entwicklung seit langem eingestellt.
- äußere Gemischbildung: Bildung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Einlasssystem (Einspritzung oder Vergaser (veraltet)),
- innere Gemischbildung: Gemischbildung im Arbeitsraum (Einspritzung),

nach der Qualität des Gemischs:

- homogenes Gemisch: Vergaser und Saugrohrein-spritzung beim Ottomotor oder Benzindirekteinspritzung während des Ansaugtakts,
- inhomogenes (heterogenes) Gemisch: Einspritzung innerhalb sehr kurzer Zeitintervalle beim Dieselmotor und beim Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung (BDE) gegen Ende des Verdichtungstaktes

und nach dem Ort der Gemischbildung:

- direkte Einspritzung in den Arbeitsraum, zum Beispiel bei DI-Dieselmotoren und BDE-Motoren,
- indirekte Einspritzung in einen Nebenbrennraum, zum Beispiel Vorkammer- oder Wirbelkammer- sowie Luftspeicher-Dieselmotoren (IDI),
- Saugrohrein-spritzung (bei Ottomotoren), zentral oder zylinderindividuell.

2.2.3 Arbeitsverfahren

Beim Arbeitsverfahren wird zwischen Viertakt- und Zweitaktverfahren unterschieden. Beiden gemeinsam ist die in einem ersten Takt (Hub) ablaufende Verdichtung der Ladung (Luft- oder Kraftstoffdampf-Luft-Gemisch) durch Verringerung des Arbeitsraumes sowie die im Bereich des oberen Totpunktes der Kolbenbewegung einsetzende Zündung, die Verbrennung mit einer Druckerhöhung bis auf maximalen Zylinderdruck und Ausdehnung des Arbeitsgases im darauffolgenden Takt, bei der am Kolben Arbeit geleistet wird.

Das Viertaktverfahren benötigt zwei weitere Takte, um das Verbrennungsgas durch Ausschleiben aus dem Arbeitsraum zu entfernen und durch Ansaugen den Arbeitsraum mit frischer Ladung zu füllen.

Beim Zweitaktverfahren erfolgt der Ladungswechsel im Bereich des unteren Totpunktes bei nur noch geringer Änderung des Arbeitsvolumens durch Ausspülen der Verbrennungsgase mit frischer Ladung, so dass für die Verdichtung und Ausdehnung nicht der volle Hub ausgenutzt wird. Für den Spülvorgang ist oft ein zusätzliches Spülgebläse erforderlich, siehe auch ► Kap. 10.

2.2.4 Gemischbildung

Eine Unterscheidung von Verbrennungsmotoren bezüglich der Gemischbildung kann folgendermaßen vorgenommen werden, siehe auch ► Kap. 12:

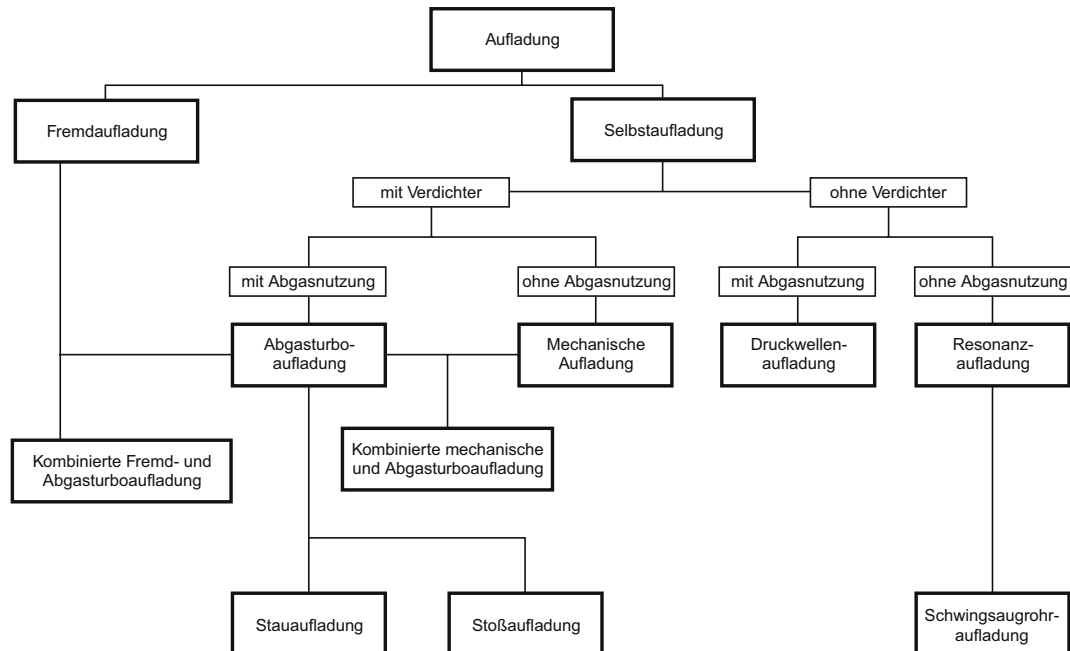
2.2.5 Ladungswechselsteuerung

Zur Steuerung des Ladungswechsels kommen Ventil-, Schlitz- und Schiebersteuerungen zur Anwendung.

Bei der Ventilsteuerung unterscheidet man obengesteuerte und untergesteuerte Motoren [7]. Der obengesteuerte Motor hat hängende Ventile; das heißt die Schließbewegung der Ventile erfolgt gleichsinnig mit der Kolbenbewegung in Richtung OT. Umgekehrt hat der untergesteuerte Motor stehende Ventile und die Ventilschließbewegung erfolgt gleichsinnig mit der Kolbenbewegung in Richtung UT.

Bei modernen 4-Takt-Motoren wird ausschließlich die „overhead valves“ (ohv)-Bauweise mit hängenden, im Zylinderkopf angeordneten Ventilen verwendet. Die Nockenwelle kann dabei im Zylinderkopf oder im Zylinderkurbelgehäuse angeordnet sein.

Bei 2-Takt-Motoren kommen überwiegend Schlitzsteuerungen (Schlitze in der Zylinderbüchse, Kolben als Schieber), in Einzelfällen auch Auslassventile, Kegel-, Walzen-, Flachschieber sowie Membransteuerungen zur Anwendung. Bei großen 2-Takt-Schiffsdieselmotoren werden üblicherweise Auslassventile verwendet.



■ **Abb. 2.3** Prinzipielle Möglichkeiten der Aufladung (nach [13])

2.2.6 Ladungseinbringung

Beim Saugmotor wird die Frischladung (Luft oder Gemisch) durch den Arbeitskolben in den Zylinder gesaugt (Selbstansaugen).

Durch Aufladung wird die Ladungsmenge durch Vorverdichtung vergrößert; dabei fördert ein Verdichter die Frischladung in den Zylinder. Vorrangige Ziele der Aufladung sind Leistungs- und Drehmomentensteigerung, Kraftstoffverbrauchs- und Abgasemissions-senkung, siehe auch ► Kap. 10 und 11.

Eine Übersicht über mögliche Aufladetechniken gibt

■ **Abb. 2.3** (nach [13]).

Die in der Praxis verbreitetste und wirkungsvollste Variante ist die Selbst- oder Eigenaufladung mit Verdichter:

- Mechanische Aufladung: Der Verdichter wird direkt vom Motor angetrieben.
- Abgasturboaufladung (dominiert sowohl bei Otto- als auch bei Dieselmotoren): Eine mit Motorabgas beaufschlagte Turbine (Abgasturbine) treibt den Verdichter an.

Verschiedenste Kombinationen dieser beiden Standard-Aufladetechniken sind in Anwendung, auch elektrisch angetriebene Verdichter (e-booster), siehe

auch ► Kap. 11. Daneben finden noch Verfahren ohne Verdichter Anwendung, die gasdynamische Vorgänge im Ansaug- und Abgassystem für die Ladungserhöhung nutzen.

2.2.7 Bauform

In der fast 140-jährigen Geschichte des Verbrennungsmotors sind zahlreiche Varianten der Zylinderanordnung vorgeschlagen worden. Überlebt haben nur einige wenige Standardbauformen [8, 9].

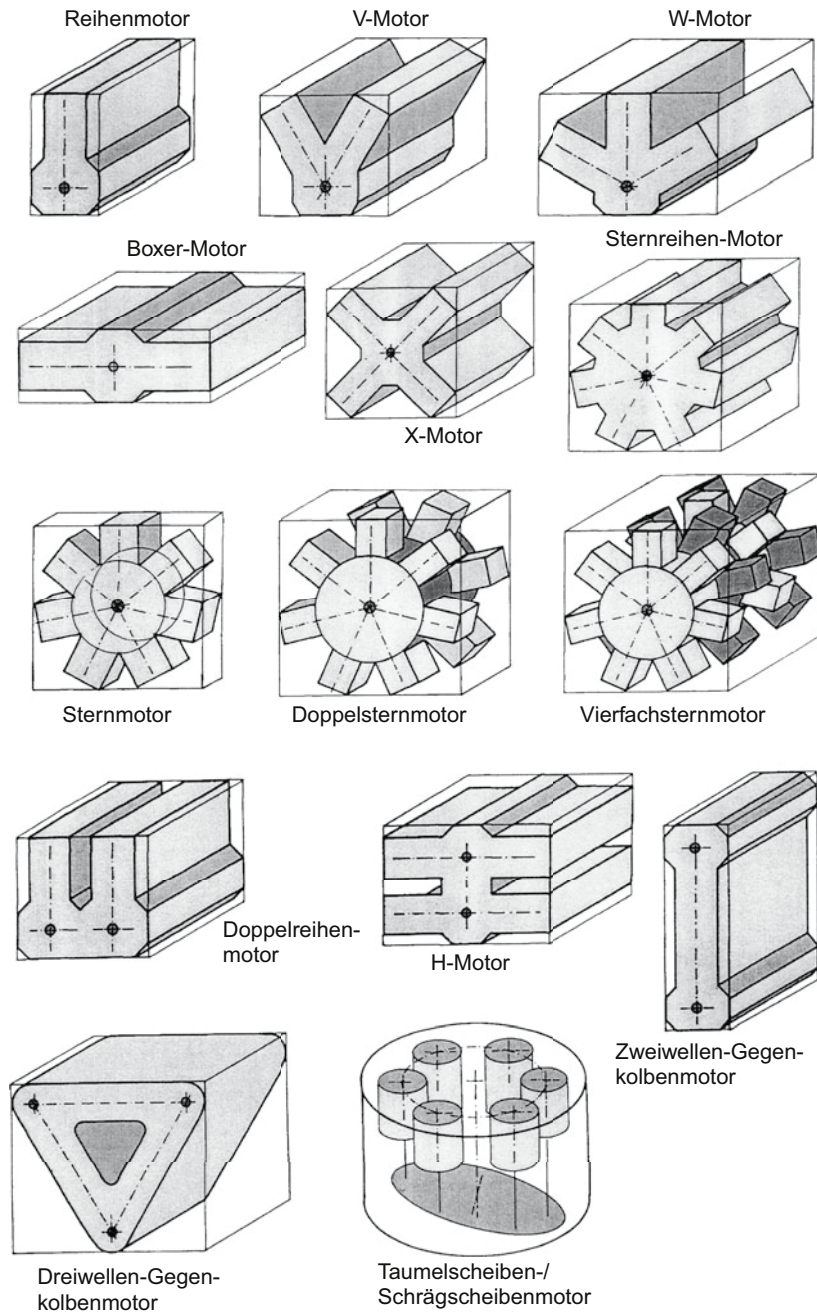
Ausgehend vom Einzylindermotor werden bei Fahrzeugmotoren Zylinderzahlen bis 12 gewählt. Flugmotoren wurden mit bis zu 48 Zylindern und Hochleistungsmotoren mit bis zu 56 Zylindern gebaut.

Bei der Zylinderanordnung gibt es zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten, die zum Teil selbsterklärend mit Buchstaben bezeichnet werden. ■ **Abb. 2.4** zeigt eine Auswahl möglicher Zylinderanordnungen und Bauformen.

Bedeutung haben heute:

- der Reihenmotor (eine Zylinderbank, eine Pleuellwelle).
- der V-Motor (zwei Zylinderbänke, eine Pleuellwelle): An jedem Pleuelzapfen sind zwei Pleuel

2



■ **Abb. 2.4** Zylinderanordnungen von Hubkolbenmotoren [8, 14]

- angelenkt. Übliche V-Winkel sind 45°, 60°, 90°, 180°. Der VR-Motor [15] hat einen V-Winkel von 15°, wobei die Kurbelwelle für jedes Pleuel einen separaten Kurbelzapfen hat.
- der W-Motor (drei Zylinderbänke, eine Kurbelwelle): Je drei Pleuel sind an einem Kurbelzapfen angelenkt. Ein V-Motor aus zwei VR-Bänken wird als V-VR-Motor oder ebenfalls als W-Motor bezeichnet [15].
- der Boxermotor: Im Unterschied zum V-Motor mit 180°-V-Winkel ist jedes Pleuel an einem separaten Kurbelzapfen angelenkt.

Bei der Triebwerkausführung hat sich der Kurbeltrieb bewährt [16]. Als Varianten werden Tauchkolben- und Kreuzkopfmotoren unterschieden. In der Literatur werden auch noch Kurbelschleifen- und Nockentriebwerke sowie kurbelwellenlose Motoren (Kurvenscheiben-, Kurvenbahn-, Taumelscheiben-, Schrägscheibenmotor) beschrieben [8].

Nach der Wirkungsweise lassen sich einfach und doppelt wirkende Motoren unterscheiden, je nachdem, ob der Kolben einseitig oder von beiden Seiten mit den Verbrennungsgasen beaufschlagt wird. Der Doppelkolbenmotor hat zwei zu einem Verbrennungsraum gehörende Kolben, die entweder gegenläufig (Gegenkolbenmotor) oder gleichläufig (U-Kolbenmotor) angeordnet sind.

Nach Lage der Zylinderachse unterscheidet man den stehenden, liegenden und hängenden Motor und nach Lage der Steuerungseinrichtung den obengesteuerten und den untergesteuerten Motor.

2.2.8 Zündung

Die Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches kann durch Fremd- oder Selbstzündung erfolgen:

- Fremdzündung (Ottomotor): Ein elektrischer Zündfunke entzündet das Gemisch im Zylinder.
- Selbstzündung (Dieselmotor): In der durch Kompression erhitzten Luft im Zylinder entzündet sich der eingespritzte Kraftstoff von selbst (Kompressionszündung).
- Bei Gasmotoren kann zum Beispiel durch eine geringe, selbstzündende Dieselmotorkraftstoffmenge das Gas-Luft-Gemisch „fremdgezündet“ werden. Auch Benzin-Luft-Gemische lassen sich bei entsprechend hoher Temperatur selbst entzünden, siehe auch ► Abschn. 14.3.

2.2.9 Kühlung

Wegen der hohen auftretenden Temperaturen muss der Verbrennungsmotor zum Schutz der Bauteile und des Schmieröles gekühlt werden. Man unterscheidet direkte und indirekte Motorkühlung.

Die direkte Kühlung erfolgt mit Luft (Luftkühlung) mit oder ohne Unterstützung durch ein Gebläse.

Bei der indirekten Kühlung wird der Motor mit einer Wasser-Frostschutz-Korrosionsschutzmischung oder mit Öl gekühlt (Flüssigkeitskühlung). Die Wärmeabfuhr an die Umgebung erfolgt durch Wärmeübertrager. Dabei wird nach Verdampfungs-, Umlauf-,

Durchfluss- und Mischkühlung unterschieden, siehe auch ► Kap. 20.

2.2.10 Lastregelung

Die Motorleistung P

$$P = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (2.1)$$

kann sowohl durch Änderung der Drehzahl n als auch des Drehmomentes M (Last) an den Bedarf angepasst werden. Bei der Lastregelung unterscheidet man:

- Quantitätsregelung oder Füllungsregelung: Eine Verstellvorrichtung (Drosselklappe, Dreh-, Flachschieber, Ventil) steuert bei annähernd konstantem Luftverhältnis λ die Gemischmenge, die in den Zylinder strömt (herkömmliche Ottomotoren).
- Qualitätsregelung: Bei Dieselmotoren und in bestimmten Betriebsbereichen bei einigen Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung (BDE) erfolgt eine bedarfsgerechte Zumessung des Kraftstoffes. Bei annähernd konstanter Luftmenge wird die Einspritzmenge variiert (variables Luftverhältnis λ).

2.2.11 Einsatzzweck

Einige Beispiele für die Verwendung von Verbrennungsmotoren sind:

- Landfahrzeuge: Straßenfahrzeuge (Zwei- und Dreiräder, Pkw, Omnibus, Nkw),
- Off-Road-Fahrzeuge: Landwirtschaftliche Maschinen und Fahrzeuge, Schlepper, Zugmaschinen, Baumaschinen,
- Schienenfahrzeuge: Triebwagen, Rangierlokomotiven, Lokomotiven für Güter- und Personenzüge,
- Wasserfahrzeuge: Boote, Binnenschiffe, Küsten- und Hochseeschiffe,
- Luftfahrzeuge: Flugzeuge, Luftschiffe,
- Gewerbe- und Industrieanwendungen: Förder- und Hebeanlagen,
- Stationäre Motorenanlagen: Motorenkraftwerke, Blockheizkraftwerke (BHKW), Elektroaggregate, Notstromaggregate und Versorgungsanlagen.

2.2.12 Drehzahl- und Leistungsabstufung

2

Verbrennungsmotoren werden in einem sehr breiten Drehzahl- und Leistungsspektrum verwendet. Ihr Leistungsbereich reicht von Modellmotoren mit 0,1 kW bis zu Großanlagen mit 100.000 kW. Mit dem Drehzahlbereich sind auch Leistung und Größe eines Motors festgelegt.

Nach der Drehzahl unterscheidet man [1]:

- langsamlaufende Motoren zum Beispiel in Schiffen (60 bis 200 l/min bei Dieselmotoren),
- mittelschnelllaufende Motoren (200 bis 1200 l/min bei Dieselmotoren, Höchstdrehzahl < 4000 l/min bei Ottomotoren),
- schnelllaufende Motoren, zum Beispiel für Pkw (Höchstdrehzahl > 1000 l/min bei Dieselmotoren, Höchstdrehzahl > 4000 l/min bei Ottomotoren).

Bei Motoren für Sport- und Rennfahrzeuge werden maximale Drehzahlen von etwa 20.000 l/min erreicht.

Literatur

Verwendete Literatur

- [1] Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*, 24. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (2014)
- [2] Kleinert, H.-J. (Hrsg.): *Kolbenmaschinen, Strömungsmaschinen*, 1. Aufl. Taschenbuch Maschinenbau, Bd. 5. Verlag Technik, Berlin (1989)
- [3] Eifler, W., Schlücker, E., Spicher, U., Will, G.: *Küttner Kolbenmaschinen*, 7. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
- [4] Reif, K., Dietsche, K.-H. (Hrsg.): *Bosch Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, 28. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden (2014)
- [5] Merker, G.: In: Teichmann, R. (Hrsg.) *Grundlagen Verbrennungsmotoren*, 7. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden (2014)
- [6] Bensinger, W.-D.: *Rotationskolben-Verbrennungsmotoren*. Springer, Berlin, Heidelberg (1973)
- [7] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *DIN 1940: Verbrennungsmotoren – Hubkolbenmotoren – Begriffe, Formelzeichen, Einheiten*. Beuth, Berlin (1976)
- [8] van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): *Lexikon Motorentechnik*, 2. Aufl. Vieweg, Wiesbaden (2006)
- [9] Beier, R., et al.: *Verdrängermaschinen, Teil II: Hubkolbenmotoren*. TÜV Rheinland, Köln (1983)
- [10] Eichlseder, H., et al.: *Grundlagen der Technologie des Ottomotors. Der Fahrzeugantrieb*, Bd. XIV. Springer, Wien, New York (2008)
- [11] Tschöke, H., Mollenhauer, K., Maier, R. (Hrsg.): *Handbuch Dieselmotoren*, 4. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (2017)

- [12] van Basshuysen, R. (Hrsg.): *Ottomotor mit Direkteinspritzung*, 3. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden (2013)
- [13] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *DIN 6262: Verbrennungsmotoren – Arten der Aufladung – Begriffe*. Beuth, Berlin (1976)
- [14] Zima, S.: *Kurbeltriebe*, 2. Aufl. Vieweg, Wiesbaden (1999)
- [15] Pischinger, S., Seiffert, U. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 8. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden (2016)
- [16] Köhler, E., Flierl, R.: *Verbrennungsmotoren*, 6. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden (2011)

Weiterführende Literatur

- [17] Rohs, U.: *Kolbenmotor mit kontinuierlicher Verbrennung*. Offenlegungsschrift DE 199 09 689 A 1, veröffentlicht: 07.09. 2000
- [18] Werdich, M., Kübler, K.: *Stirling-Maschinen: Grundlagen – Technik – Anwendung* Bd. 11. Ökobuch, Staufen (2007)
- [19] Buschmann, G., et al.: *Zero Emission Engine – Der Dampfmotor mit isothermer Expansion*. *Motortech. Z.* 61(5), 314–323 (2000)