

Klaus Mollenhauer
Helmut Tschöke
Hrsg.

Handbuch Dieselmotoren

3., neu bearbeitete Auflage

 Springer



BOSCH

VDI

Klaus Mollenhauer
Helmut Tschöke
Hrsg.

Handbuch Dieselmotoren

3., neu bearbeitete Auflage

 Springer



BOSCH

VDI

Klaus Mollenhauer · Helmut Tschöke

Handbuch Dieselmotoren

3., neubearbeitete Auflage

Mit 580 zum Teil farbigen Abbildungen und 84 Tabellen

 Springer

Professor Dr.-Ing. Klaus Mollenhauer

Orber Straße 25
14193 Berlin

klamoll@aol.com

Professor Dr.-Ing. Helmut Tschöke

Otto-von-Guericke-Universität
Institut für Mobile Systeme
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg

helmut.tschoeke@orgu.de

Herausgeber und Verlag danken der Robert Bosch GmbH, Stuttgart, für die Unterstützung bei der Veröffentlichung des Werkes.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN 978-3-540-72164-2 Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN 978-3-540-41239-7 2. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997, 2002, 2007

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. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg

Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig

Einbandgestaltung: WMX Design, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3100/YL – 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur 3. Auflage

Schon mit der 1. Auflage des Standardwerkes „Handbuch Dieselmotoren“ war beabsichtigt, den aktuellen Stand und künftige Entwicklungen der Dieselmotorentechnik zu vermitteln. Seit dem Erscheinen der 2. Auflage des Handbuchs im Jahr 2002 hat sich der Dieselmotor mit großer Dynamik als energiesparender, sauberer, leistungsstarker und komfortabler Antrieb für den mobilen und stationären Einsatz weiterentwickelt. Nach wie vor stehen angesichts beschränkter Erdölvorräte und der Diskussion um die prognostizierte Klimaveränderung die Reduzierung des Verbrauchs und der Einsatz alternativer Kraftstoffe bei größtmöglicher Abgasreinheit, weiter steigender Leistungsdichte sowie verbessertem Betriebsverhalten des Dieselmotors im Fokus der Entwicklung. Diese orientiert sich auch an den gesetzlichen Rahmenbedingungen, den Kundenanforderungen und nicht zuletzt am Wettbewerb mit dem Ottomotor als dem nach wie vor als Benchmark geltenden Pkw-Antrieb.

Vor diesem Hintergrund wurden die behandelten Themen neu gewichtet: Neben den innermotorischen Maßnahmen zur Abgasemissionsminderung mit Hilfe neuer Brennverfahren und neuer Kraftstoffe ist vor allem der Abschnitt Abgasnachbehandlung stark erweitert worden. Der im Pkw-Bereich Ende der neunziger Jahre serienmäßig eingeführte Oxydationskatalysator genügte bald nicht mehr den gestiegenen Anforderungen an die Lufthygiene: Partikelfilter und Systeme zur Stickoxidreduzierung, z. B. SCR- und Speicherkatalysatoren, erhielten deshalb mehr Gewicht.

Die neuen Brennverfahren mit einem gegenüber der normalen Diffusionsverbrennung gesteigerten Anteil an vorge-mischter, homogener Verbrennung gehören ebenso zum Inhalt des Handbuchs wie die Entwicklung der Aufladung zur Steigerung der Leistungsausbeute, wobei mit erhöhtem effektiven Mitteldruck auch der Zylinderspitzendruck und damit die Grenze der Belastung zunimmt. Zeichnete sich Ende der neunziger Jahre mit dem Umstieg von der indirekten zur direkten Einspritzung im Pkw-Bereich das Common-Rail-System als das kommende Einspritzverfahren ab,

so galt es zu Beginn des neuen Jahrtausends als bei Pkw-Motoren etabliert und wurde – zunächst noch versuchsweise – auch bei größeren Dieselmotoren eingesetzt. Heute findet man das Common-Rail-System serienmäßig bei nahezu allen Baugrößen der Dieselmotoren. Folglich werden die verschiedenen Ausführungsformen, z. B. mit magnetventilgesteuerten oder piezoaktuierten Injektoren, entsprechend der aktuellen, jedoch noch nicht abgeschlossenen Entwicklung ausführlich behandelt. Dementsprechend wird auch der Elektronik mit ihren vielfältigen Möglichkeiten zur Steuerung und Regelung von Prozessabläufen im Motor breiter Raum eingeräumt.

Herausgeber und Verlag wollen mit dieser dritten, in weiten Bereichen völlig neu bearbeiteten Auflage dem Anspruch gerecht werden, dem Leser den Dieselmotor und sein großes Anwendungsspektrum wissenschaftlich und praxisnah vorzustellen. Das Handbuch wendet sich sowohl an den Experten als auch an den technisch interessierten Nichtfachmann und den Ingenieurstudenten. Zur Aufbereitung des Fachwissens trugen über 50 Autoren – alles exzellente Dieselfachleute – sowie das kompetente Fachkuratorat des Springer-Verlags wesentlich bei. Ihnen sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Zum neuen Inhalt des Buches gesellt sich das angepasste, zweispaltige Layout und die nun fortlaufend in die Kapitel eingefügten farbigen Darstellungen der Bilder und Diagramme. Von den Helferinnen und Helfern im Hintergrund, die zum Gelingen des Buches beigetragen haben, soll stellvertretend Frau Monika Schmidt vom Institut für Mobile Systeme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, zuständig für die nicht ganz einfache Aufbereitung des Text- und Bildmaterials, dankend erwähnt werden.

Ganz besonderer Dank gilt der Robert Bosch GmbH, Geschäftsbereich Diesel Systems, für die fachliche und finanzielle Unterstützung, die erst ermöglicht hat, dieses umfangreiche Werk fertigzustellen. Den Herausgebern hat die Zusammenarbeit mit den Autoren, dem Verlag und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern trotz mancher Hektik und erheblicher Zusatzbelastung viel Freude gemacht.

Berlin
und
Magdeburg, im Sommer 2007

Klaus Mollenhauer

Helmut Tschöke

Vorwort zur 1. Auflage

„Mein Motor macht immer noch große Fortschritte ...“¹

(RUDOLF DIESEL, 1895)

Diesen Fortschritten nachzugehen, den heute erreichten Stand der Dieselmotorentchnik zu dokumentieren, ist das Anliegen dieses Buches. Den Anstoß zur Herausgabe eines VDI-Handbuches Dieselmotoren gab das Gedenken an die vor rund hundert Jahren vollzogene Umsetzung der Idee RUDOLF DIESELS von einem rationellen Wärmemotor in die Realität. Nach der Patentanmeldung im Jahre 1892 und der Aufnahme der Arbeiten an seinem Motor im darauffolgenden Jahr dauerte es weitere vier Jahre, bis der Verein Deutscher Ingenieure mit der VDI-Tagung in Kassel RUDOLF DIESEL das Podium bot, von dem aus er am 16. Juni 1897 der Öffentlichkeit seinen Motor vorstellte, der bald darauf den Namen seines genialen Erfinders trug.

Das Handbuch ist weniger für den engen Kreis der Dieselsexperten gedacht als vielmehr für den ingenieurmäßig vorgebildeten oder zumindest technisch versierten „Diesel-Laien“, der – möglicherweise angeregt durch die Diskussion um das Drei-Liter-Auto – einen umfassenden, fundierten Überblick über die Dieselmotorentchnik und ihren Entwicklungsstand gewinnen will, möglichst aus erster Hand. Aber auch dem Motorenfachmann soll das Buch im Sinne einer Gesamtschau helfen, seine Kenntnisse abseits der eigenen, oft sehr speziellen Erfahrungen zu ergänzen oder aufzufrischen.

Dieser Zielsetzung entspricht die Gliederung des Buches in fünf Hauptteile. Zunächst wird dem Leser nach einem kurzen Abriss der Geschichte des Dieselmotors Grundlagenwissen vermittelt, das u. a. auch die Aufladetechnik und die dieselmotorische Verbrennung bis hin zu den Kraftstoffen umfasst. In den folgenden drei Teilen werden Fragen zur Beanspruchung und konstruktiven Gestaltung ausgewählter

Bauteile, zum Betrieb von Dieselmotoren und die dadurch verursachte Umweltbelastung einschließlich von Maßnahmen zu deren Verminderung behandelt. Im fünften Teil wird die gesamte Motorenpalette vom Einzylinder-Kleindieselmotor bis zum großen, langsamlaufenden Zweitakt-Dieselmotor vorgestellt. Den Abschluss bildet ein Exkurs zur weiteren Entwicklung der dieselmotorischen Verbrennung, der auch die Anfänge unter RUDOLF DIESEL einer neuen Wertung unterzieht. Ein Anhang enthält auch eine Zusammenstellung der für Dieselmotoren wichtigsten Normen und Regeln.

Wegen der Allgemeingültigkeit werden mathematische Zusammenhänge als Größengleichungen dargestellt. Für Zahlenwerte werden die SI-Einheiten verwendet bei Angabe von Drücken in Bar (bar, mbar). Auf eine Zusammenstellung der Formelzeichen wurde verzichtet, da sie jeweils im Text erläutert werden und eine durchgängig einheitliche Bezeichnung angestrebt wurde. Nur bei der Kenngröße für die Arbeitsausbeute eines Motors, der spezifischen Nutzarbeit w_e bzw. dem mittleren effektivem Druck p_e konnte dies nicht erreicht werden, worauf im Text näher eingegangen wird.

Um den mit einem Handbuch Dieselmotoren verbundenen Erwartungen und Ansprüchen entsprechen zu können, war ich auf die Mitarbeit von hervorragenden Ingenieuren aus der Motorenindustrie ebenso angewiesen, wie auf die von Professoren an den Technischen Hochschulen und Universitäten. Besteht doch seit den Tagen Diesels, dessen Erfindung auf dem Ingenieurwissen seiner Zeit fußte, in der Motorenforschung eine besonders enge Verbindung zwischen Theorie und Praxis, zwischen Hochschule und Industrie. Hier ist die durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Frankfurt a.M., initiierte und betreute Gemeinschaftsforschung hervorzuheben.

Allen Autoren möchte ich für ihre Mitarbeit, das bereitwillige Eingehen auf meine Vorstellungen und die vielen fruchtbaren Diskussionen danken. Das gilt für die in der Industrie Tätigen, wo heutzutage oftmals das Äußerste an Einsatz abverlangt wird, ebenso wie für meine Kollegen an den Hochschulen, wo die Zeiten schöpferischer Muße längst der Vergangenheit angehören. Für jeden Autor ging die zu-

¹ Das Zitat entstammt einem Brief Diesels vom 3. Juli 1895 an seine Frau, nachdem zuvor am 26. Juni erstmals ein Nutzwirkungsgrad von über 16% ermittelt worden war [E. Diesel: Diesel, der Mensch, das Werk, das Schicksal. Stuttgart: Reclam 1953, a. a. O., S. 194/195].

sätzlich übernommene Arbeit zu Lasten der schon mageren Freizeit.

Deshalb möchte ich in meinen Dank auch die jeweiligen Lebenspartner und engeren Familienangehörigen einbeziehen. Ihr Verständnis unter Zurückstellen eigener Wünsche und Ansprüche – hier spreche ich aus eigener Erfahrung – hat letztlich mit zum Entstehen des gemeinsamen Werkes beigetragen.

Zu danken ist auch den Firmen, die ihren Mitarbeitern die Nebentätigkeit gestatteten, das Erstellen von Text und Bildvorlagen unterstützten sowie bereitwillig Unterlagen zur Verfügung stellten. Anerkennung gebührt auch den vielen Helfern in den Betrieben und Instituten für ihre Zuarbeit, ohne die ein derart umfangreiches Buchmanuskript nicht hätte entstehen können.

Mein Dank gilt auch den beteiligten Verlagen: Dem VDI-Verlag bzw. seinem Fachlektorat, das die Idee zu diesem Buch hatte, bei der Verlagsleitung durchsetzte und zunächst verfolgte, insbesondere jedoch dem Springer-Verlag und

Berlin, im Frühjahr 1997

seiner Produktion, die das ins Stocken geratene Projekt aufgriffen und tatkräftig vorantrieben, um es noch im Jubiläumsjahr des 100. Geburtstages des Dieselmotors auf den Markt zu bringen, um somit, wie schon einmal vor über 100 Jahren², dazu beizutragen, die Idee Rudolf Diesels vom „rationalen Wärmemotor“ zu verbreiten.

Dass der Dieselmotor bis heute die wirtschaftlichste Wärmekraftmaschine ist und sich zu dem heutigen Stand eines High-Tech-Produktes entwickelte, ist der Arbeit vieler Generationen von Werkern, Ingenieuren, Wissenschaftlern und Professoren zu danken. Ich widme daher dieses Buch dem Andenken meiner akademischen Lehrer an der Technischen Universität Berlin, meiner langjährigen Wirkungsstätte, deren Namen mit der Entwicklung des Dieselmotors in besonderem Maße verbunden sind:

WALTER PFLAUM (1896 bis 1989),
FRIEDRICH SASS (1883 bis 1968) und
HEINRICH TRIEBNIGG (1896 bis 1969).

Klaus Mollenhauer

² Diesel, R.: Theorie und Konstruktion eines rationalen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren. Berlin: Springer-Verlag 1893.

Inhaltsverzeichnis

Autorenverzeichnis	XI
-------------------------------------	----

Teil I Der Arbeitsprozess des Dieselmotors

1 Geschichte und Grundlagen des Dieselmotors	3
1.1 Historie des Dieselmotors (<i>Klaus Mollenhauer</i>).	3
1.2 Motortechnische Grundlagen (<i>Klaus Mollenhauer</i>).	9
1.3 Berechnung des realen Arbeitsprozesses (<i>Klaus Schreiner</i>).	20
2 Ladungswechsel und Aufladung (<i>Helmut Pucher</i>).	34
2.1 Ladungswechsel	34
2.2 Aufladung von Dieselmotoren.	42
2.3 Programmierter Ladungswechselberechnung	63
3 Dieselmotorische Verbrennung (<i>Klaus B. Binder</i>)	68
3.1 Gemischbildung und Verbrennung	68
3.2 Konstruktive Merkmale	78
3.3 Alternative Verbrennungsverfahren	82
3.4 Prozesssimulation von Einspritzverlauf und Brennverlauf	84
4 Kraftstoffe	86
4.1 Dieseldieselkraftstoff für Fahrzeugmotoren (<i>Gerd Hagenow, Klaus Reders</i>).	86
4.2 Alternative Kraftstoffe (<i>Hanns-Erhard Heinze, Wolfgang Steiger</i>)	105
4.3 Schwerölbetrieb von Schiffs- und Stationärmotoren (<i>Detlef Zigan</i>).	118
4.4 Brenngase und Gasmotoren (<i>Dirk Mooser</i>)	129
5 Kraftstoffeinspritztechnik	143
5.1 Einspritzhydraulik (<i>Walter Egler</i>)	143
5.2 Einspritzdüsen und Düsenhalter (<i>Rolf Jürgen Giersch</i>)	146

5.3 Einspritzsysteme (<i>Friedrich Boecking, Jürgen Hammer, Jaroslav Hlousek, Patrick Mattes, Ulrich Projahn, Winfried Urner</i>)	153
5.4 Messtechnik für Einspritzsysteme (<i>Björn Janetzky</i>)	192
6 Regelung und Steuerung der Kraftstoffeinspritzsysteme	198
6.1 Mechanische Regelung (<i>Ulrich Projahn</i>)	198
6.2 Elektronische Regelung (<i>Helmut Randoll</i>)	198
6.3 Sensoren (<i>Erich Biermann, Jörg Brückner, Karsten Funk, Thomas Küttner</i>)	208
6.4 Diagnose (<i>Walter Lehle</i>)	211
6.5 Applikation (<i>Joachim Zuern</i>).	214

Teil II Zur Konstruktion von Dieselmotoren

7 Belastung von Motorbauteilen	219
7.1 Mechanische und thermische Bauteil- belastung (<i>Dietmar Pinkernell</i>)	219
7.2 Wärmeübergang und Wärmebelastung im Motor (<i>Michael Bargende</i>)	228
8 Gestaltung, Mechanik und Beanspruchung des Triebwerks	247
8.1 Bauformen und mechanische Eigenschaften des Triebwerks (<i>Eduard Köhler</i>)	247
8.2 Beanspruchung des Triebwerks (<i>Eduard Köhler</i>)	254
8.3 Massenausgleich des Triebwerks (<i>Eduard Köhler</i>)	263
8.4 Drehschwingungen des Triebwerks (<i>Eduard Köhler</i>)	277
8.5 Lager und Lagerwerkstoffe (<i>Eckhart Schopf</i>)	288
8.6 Kolben, Kolbenringe und Kolbenbolzen (<i>Uwe Mohr</i>)	300

9 Motorkühlung 324
 9.1 Interne Motorkühlung (*Klaus Mollenhauer*) . 324
 9.2 Externe Motorkühlsysteme (*Jochen Eitel*). . . 345

10 Werkstoffe und ihre Auswahl (*Johannes Betz*) 378
 10.1 Bedeutung der Werkstoffe für den Dieselmotor 378
 10.2 Technische Werkstoffe für Motorenteile . . . 379
 10.3 Faktoren für die Werkstoffauswahl 388
 10.4 Lebensdauerkonzepte und Werkstoffdaten. . 388
 10.5 Verfahren zur Lebensdauersteigerung 390
 10.6 Entwicklungstendenzen 392

Teil III Betrieb von Dieselmotoren

11 Schmierstoffe und Schmiersystem (*Hubert Schwarze*) . 399
 11.1 Schmierstoffe 399
 11.2 Schmiersystem. 411

12 Start- und Zündhilfesysteme (*Wolfgang Dressler, Stephan Ernst*) 418
 12.1 Bedingungen zur Kraftstoffselbstzündung . 418
 12.2 Kraftstoffzündung mit Hilfsmitteln 418
 12.3 Start- und Zündhilfesysteme. 419
 12.4 Kaltstart-, Kaltlaufverhalten und Kaltlaufemissionen bei Pkw-Motoren. 420

13 Ansaug- und Abgasanlagen 429
 13.1 Luftfilter (*Oswald Parr*). 429
 13.2 Abgasanlagen (*Leonhard Vilser*). 436

14 Abwärmeverwertung (*Franz Hirschbichler*) 444
 14.1 Grundlagen der Abwärmenutzung 444
 14.2 Möglichkeiten der Abwärmenutzung. 446

Teil IV Umweltbelastung durch Dieselmotoren

15 Abgasemission von Dieselmotoren 461
 15.1 Allgemeine Zusammenhänge (*Helmut Tschöke*) 461
 15.2 Abgasgesetzgebung (*Andreas Graf, Jürgen Stein*) 471
 15.3 Schadstoffe und ihre Entstehung (*Michael Krüger, Johannes Schaller*) 488
 15.4 Innermotorische Maßnahmen zur Schadstoffreduktion (*Michael Krüger, Johannes Schaller*) 495
 15.5 Abgasnachbehandlung (*Michael Krüger, Norbert Breuer*) 502

15.6 Abgasmessverfahren (*Kurt Engeljehringler, Wolfgang Schindler*) 518

16 Geräuschemission von Dieselmotoren 537
 16.1 Grundlagen der Akustik (*Bruno M. Spessert*) 537
 16.2 Entwicklung der Motorgeräuschemission (*Bruno M. Spessert*) 537
 16.3 Motoroberflächengeräusch (*Bruno M. Spessert*) 539
 16.4 Aerodynamische Motorgeräusche (*Bruno M. Spessert*) 550
 16.5 Geräuschreduktion durch Kapselung (*Hans A. Kochanowski*) 551
 16.6 Geräteseitige Motorgeräuschdämmung (*Bruno M. Spessert*) 555

Teil V Ausgeführte Dieselmotoren

17 Fahrzeugdieselmotoren 561
 17.1 Dieselmotoren für Personenkraftwagen (*Fritz Steinparzer*) 561
 17.2 Dieselmotoren für leichte Nutzfahrzeuge (*Klaus Blumensaat, Georg Paehr*) 578
 17.3 Dieselmotoren für schwere Nutzfahrzeuge und Busse (*Wolfgang Held*). 585
 17.4 Schnellaufende Hochleistungsdieselmotoren (*Christoph Teetz*) 604

18 Industrie- und Schiffsmotoren 619
 18.1 Einzylinder-Kleindieselmotoren (*Günter Kampichler*) 619
 18.2 Einbau- und Industriemotoren (*Heiner Bülte*) 630
 18.3 Mittelschnellaufende Viertakt-Dieselmotoren (*Franz Koch*) 642
 18.4 Langsamlaufende Zweitakt-Dieselmotoren (*Klaus Heim*). 658

Normen und Richtlinien für Verbrennungsmotoren* 675

Sachverzeichnis 685

Inserentenverzeichnis 703

* Die Zusammenstellung der Normen und Richtlinien wurde uns dankenswerterweise vom VDMA, Fachverband Power Systems, Frankfurt/M., zur Verfügung gestellt.

Autorenverzeichnis

- Bargende, Michael*, Prof. Dr.-Ing., IVK-Universität
Stuttgart: Abschn. 7.2
- Betz, Johannes*, Langenargen: Kap. 10
- Biermann, Erich*, Dr.-Ing., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 6.3
- Binder, Klaus B.*, Prof. Dr.-Ing., Deizisau: Kap. 3
- Blumensaat, Klaus*, Volkswagen AG, Wolfsburg: Abschn.
17.2
- Boecking, Friedrich*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 5.3
- Breuer, Norbert*, Dr.-Ing., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 15.5
- Brückner, Jörg*, Dr., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 6.3
- Bülte, Heiner*, Dr.-Ing., Deutz AG, Köln: Abschn. 18.2
- Dressler, Wolfgang*, Dr., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Kap. 12
- Egler, Walter*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart: Abschn. 5.1
- Eitel, Jochen*, Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart: Abschn.
9.2
- Engeljehringer, Kurt*, AVL List GmbH, Graz: Abschn. 15.6
- Ernst, Stephan*, Dr., Robert Bosch GmbH, Stuttgart: Kap. 12
- Funk, Karsten*, Dr.-Ing., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 6.3
- Giersch, Rolf Jürgen*, Dipl.-Ing., Robert Bosch GmbH,
Stuttgart: Abschn. 5.2
- Graf, Andreas*, Dipl.-Ing., DaimlerChrysler AG,
Sindelfingen: Abschn. 15.2
- Hagenow, Gerd*, Dr., Shell Global Solutions (Deutschland)
GmbH, Hamburg: Abschn. 4.1
- Hammer, Jürgen*, Dr.-Ing., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 5.3
- Heim, Klaus*, Wärtsilä NSD Schweiz AG, Winterthur/
Schweiz: Abschn. 18.4
- Heinze, Hanns-Erhard*, Dr.-Ing., Otto-von-Guericke-
Universität Magdeburg: Abschn. 4.2
- Held, Wolfgang*, Dr.-Ing., MAN Nutzfahrzeuge AG,
Nürnberg: Abschn. 17.3
- Hirschbichler, Franz*, Dr., MDE Dezentrale Energiesysteme
GmbH, Augsburg: Kap. 14
- Hlousek, Jaroslav*, Dipl.-Ing., Robert Bosch GmbH,
Hallein/Österreich: Abschn. 5.3
- Janetzky, Björn*, Dr.-Ing., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 5.4
- Kampichler, Günter*, Dipl.-Ing., Ruhstorf/Rott: Abschn.
18.1
- Koch, Franz*, Dr.-Ing., MAN B&W Diesel Ltd., Stockport/
England: Abschn. 18.3
- Kochanowski, Hans A.*, Dr.-Ing., Hatz GmbH & Co. KG,
Ruhstorf/Rott: Abschn. 16.5
- Köhler, Eduard*, Dr.-Ing. habil., Heilbronn: Abschn. 8.1 bis
8.4
- Krüger, Michael*, Dr., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 15.3 bis 15.5
- Küttner, Thomas*, Dipl.-Ing., Robert Bosch GmbH,
Stuttgart: Abschn. 6.3
- Lehle, Walter*, Dr., Robert Bosch GmbH, Stuttgart: Abschn.
6.4
- Mattes, Patrick*, Dr., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 5.3
- Mohr, Uwe*, Dr., Stuttgart: Abschn. 8.6
- Mollenhauer, Klaus*, Prof. Dr.-Ing., Berlin: Abschn. 1.1, 1.2
und 9.1
- Mooser, Dirk*, Dr.-Ing., Caterpillar Motoren GmbH & Co.
KG, Kiel: Abschn. 4.4
- Paehr, Georg*, Dr., Volkswagen AG, Wolfsburg: Abschn.
17.2
- Parr, Oswald*, Dr.-Ing., Ludwigsburg: Abschn. 13.1
- Pinkernell, Dietmar*, MAN Diesel SE, Augsburg: Abschn.
7.1
- Projahn, Ulrich*, Dr.-Ing., Robert Bosch GmbH, Stuttgart:
Abschn. 5.3 und 6.1
- Pucher, Helmut*, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität
Berlin: Kap. 2
- Randoll, Helmut*, Dr. rer. nat., Robert Bosch GmbH,
Stuttgart: Abschn. 6.2

- Reders, Klaus*, Dipl.-Ing., Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH, Hamburg: Abschn. 4.1
- Schaller, Johannes*, Dr., Robert Bosch GmbH, Stuttgart: Abschn. 15.3 und 15.4
- Schindler, Wolfgang*, Dr., AVL List GmbH, Graz: Abschn. 15.6
- Schopf, Eckhart*, Dr.-Ing., Federal Mogul Wiesbaden GmbH, Wiesbaden: Abschn. 8.5
- Schreiner, Klaus*, Prof. Dr.-Ing., Bermatingen: Abschn. 1.3
- Schwarze, Hubert*, Prof. Dr.-Ing., TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld: Kap. 11
- Spessert, Bruno M.*, Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Jena: Abschn. 16.1 bis 16.4 und 16.6
- Steiger, Wolfgang*, Dr.-Ing., Volkswagen AG, Wolfsburg: Abschn. 4.2
- Stein, Jürgen*, DaimlerChrysler AG, Stuttgart: Abschn. 15.2
- Steinparzer, Fritz*, Ing., BMW Motoren GmbH, Steyr/Österreich: Abschn. 17.1
- Teetz, Christoph*, Dr.-Ing., MTU Friedrichshafen: Abschn. 17.4
- Tschöke, Helmut*, Prof. Dr.-Ing., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: Abschn. 15.1
- Urner, Winfried*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart: Abschn. 5.3
- Vilser, Leonhard*, Dr.-Ing., Fa. Eberspächer, Esslingen: Abschn. 13.2
- Zigan, Detlef*, Dr.-Ing., Kiel: Abschn. 4.3
- Zuern, Joachim*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart: Abschn. 6.5

Teil I

Der Arbeitsprozess des Dieselmotors

1	Geschichte und Grundlagen des Dieselmotors	3
2	Ladungswechsel und Aufladung	34
3	Dieselmotorische Verbrennung	68
4	Kraftstoffe	86
5	Kraftstoffeinspritztechnik	143
6	Regelung und Steuerung der Kraftstoffeinspritz- systeme	198

1 Geschichte und Grundlagen des Dieselmotors

1.1 Historie des Dieselmotors

Am 27. Februar 1892 meldet der Ingenieur Rudolf Diesel beim Kaiserlichen Patentamt zu Berlin ein Patent auf „Neue rationelle Wärmekraftmaschinen“ an, worauf ihm am 23. Februar 1893 das DRP 67207 über „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen“, datiert auf den 28. Februar 1892, erteilt wird: Ein wichtiger, erster Schritt auf dem Weg zu dem selbst gesetzten Ziel, das Diesel seit seiner Studienzeit beschäftigt, wie seiner Biographie zu entnehmen ist:

Geboren am 18. März 1858 in Paris als Sohn deutscher Eltern verschlägt es ihn, noch ein Schuljunge, mit Ausbruch des Deutsch-Französischen Krieges 1870/71 über London nach Augsburg, wo er bei Pflegeeltern aufwächst. Ohne familiären und finanziellen Rückhalt ist der junge Rudolf Diesel gezwungen, sein Leben selbst zu organisieren und u.a. durch Nachhilfeunterricht zum Unterhalt beizutragen. Stipendien ermöglichen ihm schließlich ein Studium am Polytechnikum München, der späteren Technischen Hochschule, das er 1880 als bester aller bis dahin Examinierten verlässt.

Dort, in den Vorlesungen von Professor Linde über die „Theorie der Calorischen Maschinen“, wird dem Studenten Diesel klar, welche enorme Energieverschwendung die Dampfmaschine, die dominierende Wärmekraftmaschine jener Zeit, betreibt, wenn man sie an dem von Carnot 1824 formulierten Idealprozess der Energiewandlung misst, s. Abschn. 1.2. Bei Wirkungsgraden von ca. 3% wird außerdem durch die lästige Rauchentwicklung damaliger Kesselfeuerungen die Luft erheblich verschmutzt!

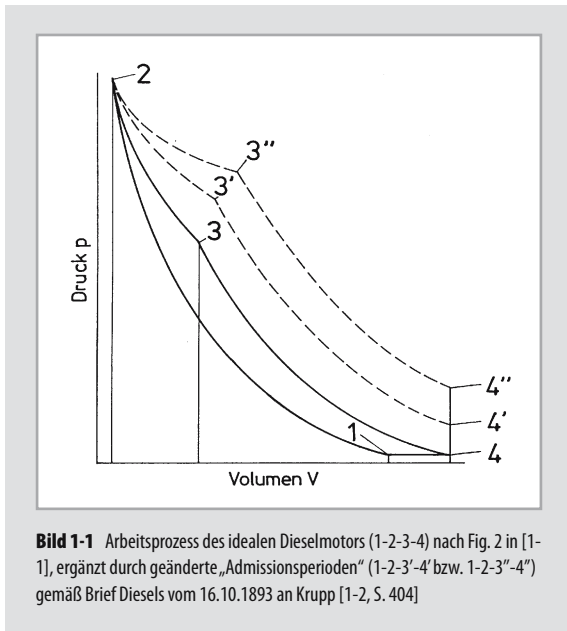
Erhaltene Kolleghefte bezeugen, dass sich schon der Student Diesel Gedanken über eine Realisierung des Carnot-Prozesses machte, möglichst durch unmittelbare Nutzung der in der Steinkohle enthaltenen Energie ohne Dampf als Zwischenmedium. Auch während seiner Tätigkeit für Lindes Eismaschinen, die ihn über Paris nach Berlin führt, verfolgt

er ehrgeizig die Idee eines rationellen Motors, von dessen Erfindung er sich wirtschaftliche Unabhängigkeit verbunden mit sozialem Aufstieg verspricht. Schließlich kommt es zur bereits erwähnten Anmeldung und Erteilung des Patents [1-1] mit folgendem Anspruch 1:

„Arbeitsverfahren für Verbrennungskraftmaschinen, gekennzeichnet dadurch, dass in einem Zylinder vom Arbeitskolben reine Luft oder anderes indifferentes Gas (bzw. Dampf) mit reiner Luft so stark verdichtet wird, dass die hierdurch entstandene Temperatur weit über der Entzündungstemperatur des zu benutzenden Brennstoffes liegt (Curve 1-2 des Diagramms Fig. 2), worauf die Brennstoffzufuhr vom toten Punkt ab so allmählich stattfindet, dass die Verbrennung wegen des ausschließenden Kolbens und der dadurch bewirkten Expansion der verdichteten Luft (bzw. des Gases) ohne wesentliche Druck- und Temperaturerhöhung erfolgt (Curve 2-3 des Diagramms Fig. 2), worauf nach Abschluss der Brennstoffzufuhr die weitere Expansion der im Arbeitszylinder befindlichen Gasmasse stattfindet (Curve 3-4 des Diagramms Fig. 2)“.

Nach der Entspannung auf den Ausgangsdruck erfolgt längs der Isobaren 4-1 (Bild 1-1) die Wärmeabfuhr und somit das Schließen des Prozesses.

Ein 2. Anspruch erhebt Patentschutz auf eine mehrstufige Kompression und Expansion, wozu Diesel einen dreizylindrigen Compoundmotor vorschlägt (Bild 1-2). In zwei, um 180° versetzt laufenden Hochdruckzylindern 2, 3 erfolgt die adiabate Kompression sowie die Selbstzündung des im oberen Totpunkt über den Trichter B so zugeführten Brennstoffs (Diesel spricht zunächst von Kohlenstaub), dass eine isotherme Verbrennung und Expansion erfolgt, die nach Brennschluss in eine adiabate übergeht. Nach Überschieben des Verbrennungsgases in den doppelwirkenden, mittleren Zylinder 1 findet dort die Restexpansion auf Umgebungsdruck und nach Bewegungsumkehr das Ausschieben statt, gleichzeitig mit der isothermen Vorverdichtung unter Wassereinspritzen bzw. dem vorhergegangenen Ansaugen der Frischladung für den parallel dazu ablaufenden zweiten



Arbeitsprozess, sodass pro Umdrehung ein Arbeitsspiel erfolgt.

Diesel greift also zur Realisierung des Carnot-Prozesses auf das seit Nikolaus Otto zum „Stand der Technik“ gehörende Viertakt-Verfahren zurück. Er glaubt, durch die isotherme Verbrennung bei maximal 800 °C die Temperaturbelastung im Motor so gering halten zu können, dass er ohne Kühlung auskommt. Diese Grenztemperatur bedingt Kompressionsdrücke von ca. 250 at, womit sich Diesel weit über den geltenden „Stand der Technik“ erhebt: Das verleiht dem „Seiteneinsteiger“ Diesel einerseits die notwendige Unbedarftheit zur Durchsetzung seiner Idee, andererseits schrecken im Motorenbau erfahrene Firmen, wie die Gasmotoren-Fabrik Deutz, vor dem Diesel-Projekt zurück.

Sich bewusst, dass „eine Erfindung aus zwei Teilen besteht: der Idee und ihrer Ausführung“ [1-3], hatte Diesel dazu eine Druckschrift „Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors“ [1-4] verfasst, die er zum Jahreswechsel 1892/93 an Professoren und Industrielle, also auch nach Deutz, verschickte, um seine Ideen zu propagieren und die Industrie für sich zu gewinnen: Bei einem Carnot-Wirkungsgrad von ca. 73% bei 800 °C erwartet er im praktischen Betrieb Verluste von maximal 30 bis 40%, was einem Nutzwirkungsgrad von ca. 50% entspräche [1-4, S. 51].

Endlich kommt es nach fast einjährigem Bemühen und Taktieren im Frühjahr 1893 zum Vertrag zwischen Diesel und der renommierten, von Heinrich Buz geleiteten Maschinenfabrik Augsburg AG, die u.a. führend im Bau von

Dampfmaschinen ist. Der Vertrag enthält Konzessionen Diesels an den Idealmotor: Der Höchstdruck wird von 250 at auf 90 at, später auf 30 at gesenkt, die 3-zylindrige Verbundmaschine auf einen Hochdruckzylinder reduziert sowie Kohlenstaub als Kraftstoff verworfen. Dem für Diesel lukrativen Vertrag treten mit Krupp und bald danach Sulzer zwei weitere Firmen des Schwermaschinenbaus bei.

Im Frühsommer 1893 beginnt man in Augsburg mit dem Bau des ersten, ungekühlten Versuchsmotors mit einem Hub von 400 mm bei 150 mm Bohrung. Als Kraftstoff ist zwar Petroleum vorgesehen, doch wird am 10. August 1893 bei geschlepptem Motor zunächst Benzin eingespritzt, in der irrigen Annahme, dass es leichter zündet: Das Prinzip der Selbstzündung erfährt zwar seine Bestätigung, wenn auch bei Drücken von über 80 bar der Indikator platzt!

Die weitere Entwicklung kann man anhand ausgewählter Indikatordiagramme verfolgen (Bild 1-3): Nach Umbau des 1. Motors, der später eine Wasserkühlung erhält, zeigt sich, dass der Kraftstoff nicht direkt, sondern nur mit Hilfe von Druckluft eingespritzt, zerstäubt und verbrannt werden kann. Mit dem 1. Leerlauf des bisher geschleppten Motors wird der Motor am 17. Februar 1894 selbstständig. Schließlich erfolgt am 26. Juni 1895 ein erster Bremsversuch: Mit Petroleum als Kraftstoff und fremderzeugter Einblaseluft wird bei einem Verbrauch von 382 g/PS_h ein indizierter Wirkungsgrad von $\eta_i = 30,8\%$ und ein Nutzwirkungsgrad von $\eta_e = 16,6\%$ ermittelt.

Doch erst mit einer Neukonstruktion, dem mit einer einstufigen Luftpumpe versehenen 3. Versuchsmotor [1-2], gelingt der Durchbruch: Am 17. Februar 1897 führt Professor Moritz Schröter von der Technischen Hochschule München Abnahmeversuche durch, deren Ergebnisse er gemeinsam mit Diesel und Buz am 16. Juni 1897 auf einer VDI-Hauptversammlung in Kassel vorstellt, damit die erste Wärmekraftmaschine mit einem seinerzeit sensationellen Wirkungsgrad von 26,2% präsentierend [1-5]!

Dazu musste die im Grundpatent beanspruchte isotherme Wärmezufuhr aufgegeben werden: Spätestens beim Auftragen der theoretischen Indikatordiagramme (Bild 1-4), muss auch Diesel klar geworden sein, dass angesichts der schmalen Diagrammfläche, die der indizierten Arbeit proportional ist, und der infolge der hohen Drücke zu erwartenden Reibungsverluste der Motor keine Nutzarbeit leisten würde. Bemüht, das Grundpatent nicht zu gefährden, stellt er frühzeitig Überlegungen zur Verlängerung der „Admissionsperiode“ an, womit ein Anheben der Linie der isothermen Wärmezufuhr im p, V -Diagramm gemeint ist (Bild 1-1). Eine zweite Patentanmeldung vom 29. November 1893 (DRP 82168) führt auch den Gleichdruckprozess auf, der wegen „nicht wesentlicher Druckerhöhung“ in Übereinstimmung mit dem Grundpatent gesehen wird. Mit der