



ATZ/MTZ-Fachbuch

Richard van Basshuysen *Hrsg.*

Ottomotor mit Direkteinspritzung

Verfahren · Systeme · Entwicklung · Potenzial

3. Auflage



BOSCH
Technik fürs Leben



Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

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

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

Richard van Basshuysen
Herausgeber

Ottomotor mit Direkteinspritzung

Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial

3. aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 399 Abbildungen

Ulrich Spicher und 24 Mitautoren

 Springer Vieweg

Herausgeber

Dr. Richard van Basshuysen
Bad Wimpfen, Deutschland

ISBN 978-3-658-01407-0
DOI 10.1007/978-3-658-01408-7

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2007, 2008, 2013

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

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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 3. Auflage

Für die 3. Auflage wurde das Werk überarbeitet und auf den neuesten Stand gebracht. Es wurde ein Abschnitt zur Vorentflammung und Flammenausbreitung bei Homogenbetrieb ergänzt.

Bad Wimpfen
Im April 2013

Richard van Basshuysen, VDI

Vorwort zur 2. Auflage

Nachdem die erste Auflage bereits nach 16 Monaten vergriffen war, ist nun die zweite Auflage erschienen.

Einige Kapitel wurden zum Teil stark überarbeitet und aktualisiert. Neu ist das Kapitel „Neue Wege zur Schadstoffreduzierung“.

Bad Wimpfen
Im August 2008

Richard van Basshuysen, VDI

Vorwort zur 1. Auflage

Mobilität verbindet.

Mobilität zu gewinnen und den Aktionskreis zu erweitern, andere Kontinente zu erforschen, ja das Weltall zu erobern: Das ist seit langer Zeit ein Menschheitstraum. Zunächst diente das Pferd zur Überwindung von Zeit und Raum. Boote und Schiffe eroberten die Weltmeere und die entferntesten Länder. Dann wurde das Rad erfunden. Schließlich der motorisierte Verkehr.

Diese Erfindung ist nicht unumstritten, da sie das ganze Leben auf unserem Planeten in nie dagewesener Weise veränderte, revolutionierte. Die Folgen sind unübersehbar. Wichtig Ökosysteme sind aus dem Gleichgewicht geraten und die Umweltverträglichkeit wurde an vielen Stellen bis heute nicht wieder hergestellt. Nicht nur Raubbau an der Natur lässt die Erde verarmen, sondern die Umweltzerstörung durch zum Beispiel riesigen Flächenverbrauch und Verschmutzung von Boden, Wasser und Luft drohen den angestammten Platz für alles Lebende zu gefährden.

Wir Ingenieure, die für den Segen und den Fluch dieser Entwicklung in starkem Maße verantwortlich sind und den heutigen Zustand maßgeblich mit zu verantworten haben, besitzen nun auch die Pflicht, die Umweltverträglichkeit dort wieder herzustellen, wo sie verloren gegangen ist. Einen kleinen Beitrag dazu soll dieses Buch leisten. Wie können wir den Recourcenverbrauch und die Schadstoffemissionen unserer Kraftfahrzeuge drastisch verringern? Welche geräuschkindernden Maßnahmen sind in unserer überlauten Welt zu ergreifen?

Diese und andere Fragestellungen soll dieses Buch behandeln und richtungsweisende Entwicklungen für den Ottomotor aufzeigen. Zum Abschluss wird ein Vergleich mit alternativen Antrieben gewagt.

Das Buch richtet sich vor allem an die Produktentwickler und Fertigungsverantwortlichen der Automobil- und Zuliefererindustrie und an deren Dienstleister. Wissenschaft, Forschung und Lehre soll es ein wichtiger Ratgeber sein.

Für den Inhalt dieses Buches dankt der Herausgeber in erster Linie den Mitautoren und stellvertretend für sie Herrn Prof. Ulrich Spicher und Mitarbeitern, die den größten Anteil dazu beigetragen haben. Alle Autoren und Ihre Firmen oder Institutionen sind im Vorspann aufgeführt. Sie haben mit unbestechlicher Fachkompetenz und Ernsthaftigkeit nicht nur den neuesten Stand des Wissens wiedergegeben, sondern auch immer wieder Prognosen in die Zukunft gewagt. Cirka 400 Bilder sorgen für anschauliche Inhalte und 427 Literaturstellen laden zu erweiterndem Studium ein.

Dank gilt auch der Robert Bosch GmbH. Ohne ihre fachliche und materielle Unterstützung wäre das Werk so nicht möglich gewesen.

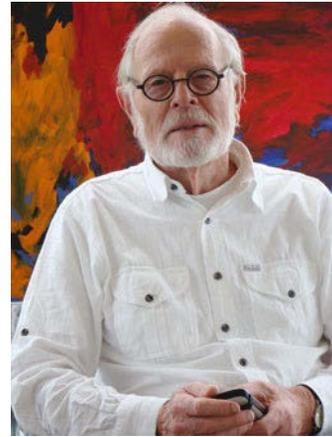
Schließlich ist es dem Vieweg Verlag und hier dem Lektorat gelungen, in kürzester Zeit überzeugende Arbeit zu leisten, weshalb das Buch aktueller nicht hätte sein können. Auch dafür möchte ich meinen Dank aussprechen.

Und nun wünsche ich dem Werk die verdiente Aufmerksamkeit.

Der Herausgeber

Dr.-Ing. E. h. **Richard van Basshuysen**, VDI, wurde 1932 in Bingen/Rhein geboren. Nach einer Lehre mit Abschluss als Kfz-Schlosser studierte er an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel von 1953 bis 1955 mit Abschluss als Ingenieur für Maschinenbau. 1982 wurde ihm der Hochschulgrad Diplom-Ingenieur verliehen. Von 1955 bis 1965 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter der Aral AG in Bochum.

1965 wechselte er zur NSU AG, wo er die Versuchsleitung der Motor- und Getriebeentwicklung einschließlich der Wankelmotorentwicklung übernahm und zum stellvertretenden Leiter des Fahrzeugversuchs berufen wurde. In dieser Funktion war er mitverantwortlich für die Entwicklung der Fahrzeuge Prinz 4, NSU 1000 und 1200, RO 80 und K 70. 1969 wurde die NSU AG von



der heutigen Audi AG übernommen. Bei der Audi AG war er dann Entwicklungsleiter der Fahrzeugkomfortklasse und Leiter der Motoren- und Getriebeentwicklung und parallel dazu Aufsichtsratsmitglied der Audi AG als gewählter Vertreter der leitenden Angestellten. Seine bedeutendste Entwicklung war die des weltweit ersten abgasentgifteten Pkw-Dieselmotors mit Direkteinspritzung und Turboaufladung, die er gegen große Widerstände auch im eigenen Hause im VW-Konzern durchsetzte. Da dieser Motor 20% weniger Kraftstoff als sein Vorgänger als Kammermotor verbraucht und ein Motor mit hoher Leistung und Drehmoment ist, hat er sich weltweit durchgesetzt. In Europa wuchs sein Marktanteil von circa 12% im Jahr 1989 bis über 50% im Jahr 2008. Nach seiner aktiven Laufbahn in der Automobilindustrie gründete Richard van Basshuysen 1992 ein Ingenieurbüro, das er bis heute leitet. Seine Aufgaben sind: Beratung internationaler Automobilhersteller und Ingenieurdienstleister und Autor und Herausgeber technisch-wissenschaftlicher Fachbücher, die auch ins Englische sowie ins Chinesische übersetzt wurden und werden. Außerdem ist er seit 2006 zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Fred Schäfer Herausgeber und Mitautor des Internetportals www.motorlexikon.de. Darüber hinaus ist er Beiratsmitglied und Mitglied des Vorstandes in verschiedenen Gremien wie zum Beispiel dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und dem Österreichischen Verein für Kraftfahrzeugtechnik. Insgesamt ist er Autor und Mitautor von über 60 technisch-wissenschaftlichen Publikationen. Seine Editorials in ATZ und MTZ erschienen von 1991 bis 2011. Im Jahr 2001 erhielt er für die Entwicklung des zukunftsweisenden Dieselmotors mit Direkteinspritzung den hochdotierten Ernst-Blickle-Preis 2000 und die BENZ-DAIMLER-MAYBACH-EHRENMEDAILLE des VDI für „seine herausragende Ingenieurleistung bei der Entwicklung des Pkw-Dieselmotors mit Direkteinspritzung sowie seine langjährigen Engagements als Herausgeber der ATZ/MTZ und als Beiratsmitglied der VDI-Gesellschaft „Fahrzeug- und Verkehrstechnik“. Für sein Lebenswerk wurde ihm 2004 von der Universität Magdeburg die Ehrendoktorwürde verliehen.

Autorenverzeichnis

Baretzky, Ulrich, Dipl.-Ing.	AUDI AG, Neckarsulm www.audi.de
Baron, Ulrich	Aral Forschung, Bochum www.aral.de
Clade, Michael	CATEM GmbH & Co. KG, Herxheim www.catem.com
Dörmer, Wolfgang	Aral Forschung, Bochum www.aral.de
Eichlseder, Helmut, Univ.-Prof. Dr.	Technische Universität Graz www.portal.tugraz.at
Elsaesser, Alfred, Dr.-Ing.	MAHLE International GmbH, Stuttgart www.mahle.com
Häntsche, Jan Patrick, Dipl.-Ing.	Deutsche Industrie- und Handelskammer in Peru
Hatz, Wolfgang, Dipl.-Ing.	Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach www.porsche.de
Heidenreich, Thomas, Dipl.-Ing.	ADA-Abgaszentrum der Automobilindustrie, Weissach www.abgaszentrum.de
Holz, Oswald, Dipl.-Ing.	EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar www.emitec.com
Hurdemann, Bernhard, Dr.-Ing.	Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg www.man-hummel.com
Ißler, Wolfgang, Dr.-Ing.	MAHLE International GmbH, Stuttgart www.mahle.com
Kubach, Heiko, Dr.-Ing.	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) www.kit.edu
Maus, Wolfgang, Dipl.-Ing.	EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar www.emitec.com
Meinig, Uwe, Dr.-Ing.	SHW Automotive GmbH, Bad Schussenried www.shw.de

Münz, Stefan, Dr.	BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH, Kirchheimbolanden www.turbos.bwauto.com
Puck, Alexander, Dipl.-Ing.	MAHLE GmbH, Stuttgart www.mahle.com
Scharnhorst, Christian, Dipl.-Betriebsw.	Robert Bosch, GmbH, Stuttgart www.bosch.de
Schmalzl, Hans Peter, Prof. Dr.-Ing.	Pankl APC Turbosystems GmbH, Mannheim www.pankl-apc.com
Schöpke, Manuel, Dr.-Ing.	Robert Bosch GmbH, Stuttgart
Seiffert, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.	Technische Universität Braunschweig www.tu-braunschweig.de
Spicher, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.	MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentechnik, Optik und Thermodynamik mbH, Karlsruhe
Stoffels, Harald, Dr.	Ford-Werke GmbH, Köln www.ford.de
van Basshuysen, Richard, Dr.-Ing. E. h.	Herausgeber und Autor, Bad Wimpfen
Wild, Stephan, Dr.-Ing.	Alfred Kärcher GmbH & Co. KG www.kaercher.de
Xander, Benedikt, Dr.-Ing.	Audi AG, Neckarsulm www.audi.de

Firmen- und Institutionenverzeichnis

Firmen

AUDI AG, Neckarsulm	Dipl.-Ing. Ulrich Baretzky Dipl.-Ing. Wolfgang Hatz Dr.-Ing. Benedikt Xander
BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH, Kirchheimbolanden	Dr. Stefan Münz
BP Europe SE, Hamburg	Wolfgang Dörmer Ulrich Baron
CATEM GmbH & Co. KG, Herxheim	Michael Clade
EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar	Dipl.-Ing. Wolfgang Maus Dipl.-Ing. Oswald Holz
Ford-Werke GmbH, Köln	Dr. Harald Stoffels
Alfred Kärcher GmbH & Co. KG, Winnenden	Dr.-Ing. Stephan Wild
MAHLE International GmbH, Stuttgart	Dr.-Ing. Wolfgang Ißler Dr.-Ing. Alfred Elsaesser
MAHLE GmbH, Stuttgart	Dipl.-Ing. Alexander Puck
Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg	Dr.-Ing. Bernhard Huurdemann
Pankl APC Turbosystems GmbH, Mannheim	Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach	Dipl.-Ing. Wolfgang Hatz
Robert Bosch GmbH, Stuttgart	Dipl.-Betriebsw. Christian Scharnhorst Dr.-Ing. Manuel Schöpke
SHW Automotive GmbH, Bad Schussenried	Dr.-Ing. Uwe Meinig

Institutionen

ADA-Abgaszentrum der Automobilindustrie, Weissach	Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich
Deutsche Industrie- und Handelskammer in Peru	Dipl.-Ing. Jan Patrick Häntsche
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Dr.-Ing. Heiko Kubach
MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentechnik, Optik und Thermodynamik mbH, Karlsruhe	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Technische Universität Braunschweig	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert
Technische Universität Graz	Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichseder

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

1 Einleitung	Dr.-Ing. E. h. Richard van Basshuysen
2 Geschichte der Benzin-Direkteinspritzung	Dr.-Ing. Uwe Meinig
3 Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich
3.1 Grundlagen der Gemischbildung	Dr.-Ing. Benedikt Xander
3.2 Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch	
3.3 Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch	
3.4 Zündung und Verbrennung	
3.5 Benzin-Direkteinspritzung bei homogen kompressionsgezündeter Verbrennung	
3.5.5 Akustik	Dr. Harald Stoffels
3.6 Kombiniertes Diesel/Otto-Verbrennungsverfahren	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
4 Einspritzsysteme und Systemübersicht	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher Dipl.-Ing. Jan Patrick Häntsche Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich
5 Leistung und Drehmoment	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
6 Aufladung	
6.1 Mechanische Aufladung	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher Dr.-Ing. Benedikt Xander
6.2 Abgasturboaufladung	Dr. Stefan Münz Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl
6.3 Synergien zwischen Abgasturboaufladung und der Direkteinspritzung bei Ottomotoren	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher Dr. Stefan Münz Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl
6.4 Hochaufladung durch elektrisch angetriebenen Lader	Dr. Stefan Münz Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl
6.5 Komplexe Aufladesysteme	Dr.-Ing. Benedikt Xander Dr. Stefan Münz Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl
7 Kraftstoffverbrauch	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

- | | |
|---|--|
| 8 Downsizing und Downspeeding | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher |
| 9 Abgasemissionen und Schadstoffreduzierung | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich |
| 9.1 Schadstoffentstehung beim Motorprozess | |
| 9.2 Gesetzliche Vorschriften | |
| 9.3 Schadstoffreduzierung einschließlich Partikel | |
| 9.4 Neue Wege der Schadstoffreduzierung | Dipl.-Ing. Wolfgang Maus
Dipl.-Ing. Oswald Holz |
| 10 Geräuschemissionen | Dr. Harald Stoffels |
| 11 Einflüsse der Benzin-Direkteinspritzung auf weitere Motor-Einzelsysteme | |
| 11.1 Zündsysteme | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dr.-Ing. Benedikt Xander |
| 11.2 Kolben | Dr.-Ing. Wolfgang Ifßler |
| 11.3 Ventile, Ventilsitzringe, Ventilführungen | Dipl.-Ing. Alexander Puck |
| 11.4 Luftansaugsysteme moderner Ottomotoren | Dr.-Ing. Stephan Wild
Dr.-Ing. Bernhard Huurdemann |
| 11.5 Kurbelgehäuseentlüftung | Dr.-Ing. Uwe Meinig |
| 11.6 Lufttaktventil | Dr.-Ing. Alfred Elsaesser |
| 11.7 Tankentlüftung | Dr.-Ing. Uwe Meinig |
| 11.8 Zuheizmaßnahmen für den Fahrzeuginnenraum | Michael Clade |
| 12 Direkteinspritzung im Hybridverbund | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert |
| 13 Betriebsstoffe | |
| 13.1 Ottokraftstoffe | Wolfgang Dörmer |
| 13.2 Schmierstoffe für Ottomotoren | Ulrich Baron |
| 14 Motorkonzepte | |
| 14.1 Serienkonzepte | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dr.-Ing. Heiko Kubach |
| 14.2 Konzepte für den Motorsport und Impulse für die Serienentwicklung | Dipl.-Ing. Ulrich Baretzky
Dipl.-Ing. Wolfgang Hatz |
| 14.3 Zweitaktmotoren mit Direkteinspritzung | Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichseder |
| 15 Marktentwicklung der Benzin-Direkteinspritzung | Dipl.-Betriebsw. Christian Scharnhorst
Dr.-Ing. Manuel Schöpke |
| 16 Ausblick | Dr.-Ing. E. h. Richard van Basshuysen
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher |

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Geschichte der Benzin-Direkteinspritzung	3
3	Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren	29
3.1	Grundlagen der Gemischbildung.....	31
3.1.1	Kraftstoffaufbereitung.....	32
3.1.2	Strömungsverhalten	36
3.2	Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch	43
3.3	Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch	52
3.3.1	Wandgeführte Brennverfahren	55
3.3.2	Luftgeführte Brennverfahren	60
3.3.3	Strahlgeführte Brennverfahren	62
3.4	Zündung und Verbrennung.....	74
3.5	Benzin-Direkteinspritzung bei homogen kompressionsgezündeter Verbrennung	89
3.5.1	Thermodynamik	89
3.5.2	Konzepte und Betriebsstrategien bei Benzin-Selbstzündung	93
3.5.3	Eingriffsmöglichkeiten bei Direkteinspritzung	97
3.5.4	Potenziale hinsichtlich Verbrauch und Schadstoffemission.....	98
3.5.5	Akustik.....	100
3.6	Kombiniertes Diesel-/Otto-Verbrennungsverfahren.....	109
4	Einspritzsysteme und Systemübersicht	117
4.1	Luftunterstützte Niederdruck-Direkteinspritzung.....	118
4.2	Common-Rail-Hochdruck-Direkteinspritzung	121
4.2.1	Hochdruck-Kraftstoffpumpe	124
4.2.2	Rail.....	129
4.2.3	Hochdruck-Einspritzventile/Einspritzdüsen.....	131
4.2.4	Einspritzstrategien.....	143
5	Leistung und Drehmoment	151
6	Aufladung	161
6.1	Mechanische Aufladung.....	164
6.2	Abgasturboaufladung	170
6.3	Synergien zwischen der Abgasturboaufladung und der Direkteinspritzung bei Ottomotoren	176
6.4	Hochaufladung durch elektrisch angetriebenen Lader	179
6.5	Komplexe Aufladesysteme.....	182

7	Kraftstoffverbrauch	189
8	Downsizing und Downspeeding	205
8.1	Downsizing	205
8.2	Downspeeding	209
9	Abgasemissionen und Schadstoffreduzierung	213
9.1	Schadstoffentstehung beim Motorprozess	213
9.2	Gesetzliche Vorschriften	218
9.3	Schadstoffreduzierung einschließlich Partikel	228
9.4	Neue Wege zur Schadstoffreduzierung	243
10	Geräuschemissionen	249
10.1	Gesetzliche Vorschriften	249
10.2	Verbrennungsgeräusche	251
10.2.1	Vergleich Gasoline Direct Injection (GDI homogen) mit GDI geschichtet	252
10.2.2	Einfluss des Drall- und Tumble-Niveaus auf die Verbrennungsanregung	253
10.2.3	Einfluss der Abgasrückführungsrate (AGR) auf das Verbrennungsgeräusch	255
10.2.4	Einfluss des Betriebsmodenwechsels	255
10.2.5	Optimierung des Leerlaufs im Schichtbetrieb	256
10.3	Mechanische Geräusche	257
10.3.1	Optimierung des Klopfregelsystems	258
10.3.2	Einfluss des Kraftstoffhochdruckverteilsystems	259
10.4	Akustikaspekte von GDI-Downsizing-Konzepten	261
10.4.1	Vergleich leistungsgleicher Aggregate	261
10.4.2	Akustik des Otto-DI-Downsizing im Vergleich	262
10.4.3	Akustik von Aufladesystemen	265
10.4.4	Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Akustik	266
10.4.5	Aktive Gestaltung der Geräuschqualität	268
11	Einflüsse der Benzin-Direkteinspritzung auf weitere Motor-Einzelsysteme	271
11.1	Zündsysteme	271
11.1.1	Funkenzündsysteme	271
11.1.2	Laserzündung	282
11.1.3	Mikrowellenzündung	286
11.2	Kolben	287
11.2.1	Werkstoffe	288
11.2.2	Herstellverfahren	291
11.2.3	Gestaltung und Bauteilfestigkeit	292
11.3	Ventile, Ventilsitzringe und Ventilführungen	297
11.3.1	Ventile und Ventilsitzringe	297

11.3.2	Ablagerungen auf Einlassventilen bei der Benzin-Direkteinspritzung.....	299
11.3.3	Ventilführungen	300
11.3.4	Leichtbauventile.....	301
11.4	Luftansaugsysteme moderner Ottomotoren.....	302
11.4.1	Thermodynamik des Ansaugsystems	303
11.4.2	Saugrohre für selbst ansaugende Motoren	306
11.4.3	Saugrohre aufgeladener Ottomotoren	308
11.4.4	Saugrohre aufgeladener Ottomotoren mit Direkteinspritzung	309
11.5	Kurbelgehäuseentlüftung.....	311
11.6	Lufttaktventil	317
11.6.1	Technologiebeschreibung	317
11.6.2	Bauprinzip und Randbedingungen.....	318
11.6.3	Thermodynamisches Potenzial.....	320
11.7	Tankentlüftung	329
11.8	Zuheizmaßnahmen für den Fahrzeuginnenraum	332
11.8.1	Einleitung.....	332
11.8.2	Zuheizerausführungen.....	332
11.8.3	Elektrischer PTC-Zuheizer luftseitig	333
11.8.4	Elektrischer Kühlwasserheizer	336
11.8.5	Brennstoffzuheizer	338
11.8.6	Visco-Heizer	339
11.8.7	Abgaswärme-Zuheizer	340
11.8.8	Zusammenfassung und Ausblick	341
12	Benzin-Direkteinspritzung im elektrischen Hybridverbund	345
12.1	Einleitung	345
12.2	Hybridantriebe für Pkw	347
13	Betriebsstoffe.....	357
13.1	Ottokraftstoffe	357
13.1.1	Einleitung.....	357
13.1.2	Allgemeine Grundlagen	357
13.1.3	Ottokraftstoffkomponenten und Ottokraftstoffaufmischung.....	360
13.1.4	Anforderungen an Ottokraftstoffe und ihre praktische Bedeutung	361
13.1.5	Kraftstoffeinflüsse auf die Abgasemissionen.....	368
13.1.6	Ottokraftstoffe mit Bioanteil: Bio-Ethanol und Ethyl-Tertiär-Buthyl-Ether (ETBE).....	369
13.2	Schmierstoffe für Ottomotoren.....	371
13.2.1	Schmierstoffarten	372
13.2.2	Aufgaben des Motoröls	372
13.2.3	Anforderungen an das Motoröl	372
13.2.4	Aufbau von Motorölen.....	373
13.2.5	Viskosität	373

13.2.6	Grundöle	376
13.2.7	Additive.....	378
13.2.8	Leistungsklassen von Motorölen.....	379
13.2.9	Betriebsstoffvorschriften der Pkw-Hersteller.....	382
13.2.10	Ausblick	384
14	Motorkonzepte	385
14.1	Serienkonzepte	385
14.1.1	Geschichte.....	385
14.1.2	Konzepte mit Schichtladung: wand- und luftgeführte Brennverfahren.....	387
14.1.3	Konzepte mit Schichtladung: strahlgeführte Brennverfahren	394
14.1.4	Konzepte mit homogenem Gemisch ohne Aufladung.....	401
14.1.5	Konzepte mit homogenem Gemisch und Aufladung	404
14.2	Konzepte für den Motorsport und Impulse für die Serienentwicklung	415
14.2.1	Einleitung.....	415
14.2.2	Benzin-Direkteinspritzung im Rennsport.....	416
14.2.3	V8 Biturbo mit Direkteinspritzung für das 24-h-Rennen von Le Mans	417
14.2.4	Übertragung auf einen 2 l Serienmotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung.....	422
14.2.5	Gegenüberstellung der Motoren mit Direkteinspritzung für den Rennsport und für die Serie.....	424
14.2.6	Zusammenfassung und Ausblick	425
14.3	Zweitakt-Ottomotoren mit Direkteinspritzung	425
14.3.1	Einleitung.....	425
14.3.2	Historie.....	426
14.3.3	Serienkonzepte	430
14.3.4	Anwendungen und Ausblick.....	434
15	Marktentwicklung der Benzin-Direkteinspritzung	443
15.1	Einleitung	443
15.2	Entwicklung in den Märkten der Triade.....	443
15.3	Entwicklung in den BRIC-Märkten.....	445
16	Ausblick	447
	Sachwortverzeichnis	453

1 Einleitung

Der Dieselmotor mit Direkteinspritzung hat in nur eineinhalb Jahrzehnten, vor allem aus Verbrauchs-, Drehmoment- und Leistungsgründen, den Kammer-Dieselmotor fast vollständig verdrängt. Nun schickt sich der Ottomotor an, es ihm gleich zu tun. Es gibt zwar schon seit fast einem Jahrhundert immer wieder Versuche, vor allem aus Leistungsgründen diesen Weg zu beschreiten, aber erst seit zirka eineinhalb Jahrzehnten, seit der Einführung des Konzeptes zur Benzin-Direkteinspritzung von Mitsubishi in Europa, stehen die ersten Technologien zur Verfügung, um eine Markteinführung erfolgreich zu bestehen. Die zu überwindenden Schwierigkeiten sind jedoch ganz erheblich komplexer als beim Dieselmotor mit Direkteinspritzung, weshalb die Marktdurchdringung beim Ottomotor deutlich länger dauern wird. Der Gewinn an Leistung und Drehmoment, das große Potenzial zur Verbrauchssenkung und die Verringerung der Schadstoffemissionen erzwingen jedoch geradezu diesen Weg.

Bei näherer Betrachtung werden drei Entwicklungsrichtungen mit unterschiedlichen Ergebnissen verfolgt:

1. Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch
2. Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch
3. Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch und kontrollierter Selbstzündung, kompressionsgezündet.

Zu 1: Vergleichsweise einfach gestaltet sich die Entwicklung der Direkteinspritzung mit mehr oder weniger homogenem Gemisch. Es erfordert keine Sonderkraftstoffe, da die heutige Abgasnachbehandlung im Prinzip beibehalten werden kann. Dadurch ist dieses Verfahren weltweit geeignet. Bei diesem Verfahren steht die Optimierung von Leistung und Drehmoment und das dynamische Verhalten im Vordergrund. Beeinflusst durch erste beachtliche Erfolge im Motorsport steht dieses Konzept für besonders leistungsstarke und somit sportliche Fahrzeuge.

Zu 2: Die Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch wird vor allem zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emission weiterentwickelt. Neben dem wandgeführten Konzept von Mitsubishi haben in Europa auch luftgeführte Verfahren Eingang in die Serie gefunden. Die erwarteten Verbrauchsvorteile dieser Verfahren sind jedoch prinzipbedingt vor allem im höheren Last- und Drehzahlbereich nicht eingetreten. Daher bestehen berechtigte Zweifel am Sinn dieser Konzepte, da sie wegen erhöhtem Aufwand für die Nachbehandlung der Abgase im überstöchiometrischen Bereich und wegen der erforderlichen schwefelfreien Kraftstoffe zu aufwändig sind und nicht weltweit eingesetzt werden können. Unter diesen Aspekten tritt seit einiger Zeit wieder das strahlgeführte Verfahren in den Vordergrund. Es stellt zwar noch höhere Ansprüche an die Gemischbildung, lässt jedoch Kraftstoffverbrauchseinsparungen von bis zu 20% er-

warten. Das ist die selbe beachtliche Größenordnung, die beim Dieselmotor bei der Umstellung von Kammermotoren auf Direkteinspritzung erreicht wurde. Dadurch bleibt dem Dieselmotor nur noch ein Verbrauchsvorteil von 10 bis 15% volumetrisch.

Zu 3: Im Forschungsbereich werden seit langem Verfahren mit Direkteinspritzung untersucht, bei denen mit homogenem Gemisch und kontrollierter Selbstzündung, kompressionsgezündet, gearbeitet wird. Sie sind auch unter den englischen Bezeichnungen „HCCI“ (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) und „CAI“ (*Controlled Auto-Ignition*) bekannt und werden als neue Brennverfahren für benzin- und dieselmotoren betriebene Motoren entwickelt. Aufgrund des großen Potenzials in Bezug auf Konzepte mit Niedrigstemissionen bei einem guten Verbrennungswirkungsgrad werden große Hoffnungen in sie gesetzt. In Verbindung mit Kraftstoffen, die speziell für diese Brennverfahren entwickelt werden, könnte ein lange gehegter Traum in Erfüllung gehen: Aus den heutigen Brennverfahren für Ottomotoren einerseits und für Dieselmotoren andererseits könnte ein optimales gemeinsames neues Brennverfahren hervorgehen, das die Vorteile beider Motoren vereint.

2 Geschichte der Benzin-Direkteinspritzung

Im Sinne einer technisch evolutionären Betrachtungsweise lässt sich die Dampfmaschine als der Vorläufer des Verbrennungsmotors ansehen. Während bei der Dampfmaschine als Wärmekraftmaschine mit äußerer Verbrennung die thermische Energie der Verbrennungsgase dem Arbeitsmedium über einen Wärmetauscher zugeführt wird, ist es Kennzeichen des Verbrennungsmotors, die im Kraftstoff gebundene chemische Energie im Triebwerk selbst zu einem möglichst großen Teil in mechanische Arbeit umzuwandeln. Bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren stellte vom Beginn an, neben der Entflammung des Arbeitsgases, die Gemischbildung, das heißt die Dosierung, Aufbereitung und Mischung des Kraftstoffs mit der Verbrennungsluft, die eigentliche entwicklerische Herausforderung dar.

Als erste erfolgreiche Verwirklichung eines Hubkolben-Verbrennungsmotors ist ein von Jean Joseph Etienne Lenoir 1860 konzipierter, noch ohne Gemischverdichtung, aber bereits mit elektrischer Funkenzündung ausgerüsteter Leuchtgasmotor, anzusehen. Im Jahr 1867 patentierte Nikolaus August Otto den nach ihm benannten ersten atmosphärischen Gasmotor. Von diesem Motor abgeleitet realisierte er 1876 bei Deutz den in seinen Merkmalen (Viertaktverfahren, Vorverdichtung des Luft-Gasgemisches) jedoch von Beau de Rochas bereits 1862 beschriebenen ersten Viertaktmotor. Dieser markiert einen wichtigen entwicklerischen Meilenstein zur Verwirklichung erster Automobile mit Benzinmotoren im Jahr 1886, die durch Carl Benz und Gottlieb Daimler sowie Wilhelm Maybach entwickelt wurden. Sowohl bei den ersten von Benz als auch von Daimler gebauten Fahrzeugmotoren erfolgte die Gemischbildung in unabhängig von einander entwickelten Schwimmervergäsern, bei denen die Ansaugluft durch eine mittels Schwimmer auf konstanter Höhe gehaltene Benzinsäule geleitet wurde. Bei beiden Vergaserkonzepten wurde die Verdampfung des Kraftstoffs durch die Zufuhr von Wärme gefördert.

Einen grundlegenden Schritt zur Lösung des Problems der Gemischbildung bei Ottomotoren stellte die Erfindung des Maybachschen Spritzdüsenvergäsert im Jahr 1893 dar. Bei diesem für Jahrzehnte wegweisenden Gemischbildungskonzept ragt eine Kraftstoffdüse in einen im betreffenden Bereich im Querschnitt verringerten Ansaugkanal. Die durch die Querschnittverringernng beschleunigte Ansaugströmung bewirkt ein Ansaugen und eine Zerstäubung des aus der Düse austretenden Kraftstoffs. Auch bei diesem Vergaser wird das Kraftstoffniveau an der Düse mittels eines Schwimmers auf einem konstantem Niveau gehalten.

Die Benzineinspritzung besitzt eine ähnlich lange Entwicklungsgeschichte wie der Vergaser. Bereits 1877 ließ sich Nikolaus August Otto die Idee, den Kraftstoff direkt in den Brennraum einzubringen, patentieren [1]. Im Jahre 1884 wurden erstmals von der Halle'schen Maschinenfabrik Stationärmotoren mit Kraftstoffeinspritzung hergestellt [2]. **Bild 2.1** zeigt einen Schnitt durch den Zylinder und das Einspritzsystem dieses von Johannes Spiel konstruierten Motors.

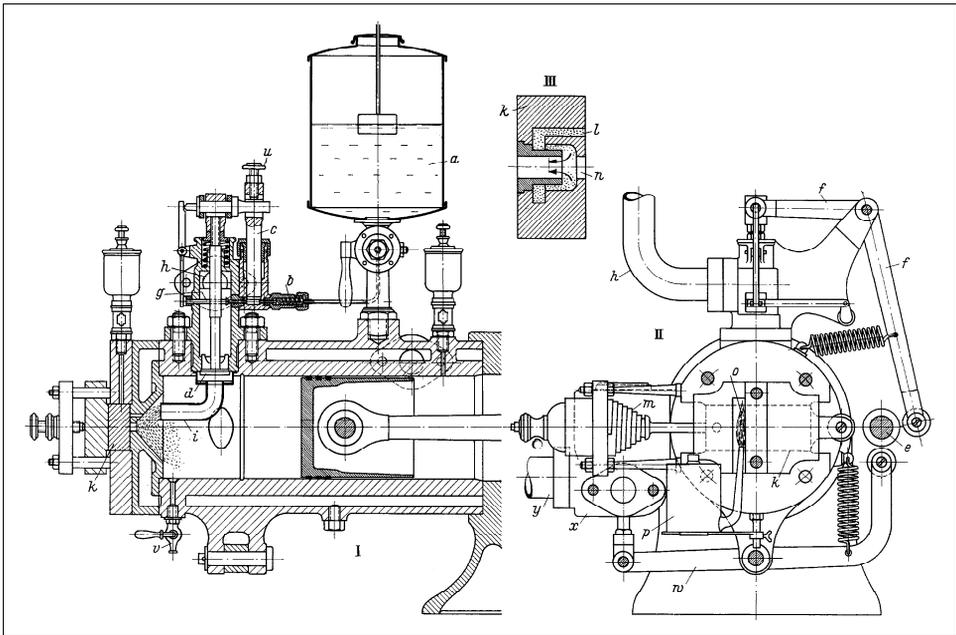


Bild 2.1: Schnittdarstellung des Benzinmotors von Johannes Spiel aus dem Jahr 1884 mit Einspritzung des Kraftstoffs in das Saugrohr [2]

a Benzinbehälter, *b* Saugventil, *c* Stempel der Einspritzpumpe, *d* mechanisch gesteuertes Gemischeinlassventil, *e* Nockenwelle, *f* Winkelhebel, *g* Druckventil der Einspritzpumpe, *h* Luftzufuhrleitung, *i* Krümmer für Gemischführung, *k* Zündschieber, *l* Hohlraum für die Vermittlungsflamme, *m* Feder zum Bewegen des Zündschiebers, *n* Zündöffnung im Schieber, *o* Zündflamme, *p* Spiritusbehälter, *u* Handschraube zum Vergrößern der Benzinförderung beim Anfahren, *v* Ablasshahn, *w* Hebel zum Steuern des Auspuffventils, *x* Auspuffventil, *y* Auspuffleitung

Vom Benzinbehälter *a* strömt das Benzin durch das Saugventil *b* in den Zylinder der Einspritzpumpe. Der Stempel *c* der Einspritzpumpe wird gemeinsam mit dem Einlassventil *d* über einen von der Nockenwelle *e* bewegten Winkelhebel betätigt. Während des Verdichtungshubs des Pumpenkolbens *c* wird das zuvor angesaugte Benzin durch das Druckventil *g* in den Ansaugkanal vor das Einlassventil gespritzt. Das im Sinne einer nach außen öffnenden Einspritzdüse wirkende Druckventil der Einspritzpumpe dichtet mit einem konischen Dichtsitz, wodurch ein kegelförmiger Spritzkegel erzeugt wird. Die Einspritzmenge lässt sich durch die Änderung des Hubs des Einspritzpumpenstempels mittels Handschraube *u* variieren. Erwähnenswert ist bei diesem Motor auch die gezielte Erzeugung einer Ladungsschichtung. Damit das angesaugte Kraftstoff-Luftgemisch direkt in die Nähe der Zündeinrichtung gelangt, wird der Ansaugkrümmer bis in den Brennraum geführt. Die Rohrmündung ist dabei in Richtung des Zylinderdeckels gerichtet. Hierdurch werden die in diesem Bereich vorhandenen, schwer entflammaren Restgase verdrängt. Die Entflammung des Kraftstoff-Luftgemisches erfolgt ähnlich wie bei den von Nikolaus August Otto zu jener Zeit konzipierten Motoren mittels einer ebenso von der Nockenwelle betätigten Flammenzündeinrichtung.

Ebenfalls in das Jahr 1884 fallen, wie in [2] dargestellt, im Zusammenhang mit der Entwicklung von Fahrzeugmotoren von Wilhelm Maybach angestellte Überlegungen, anstelle eines „Verdunstungsapparates“ für die Dosierung und Zerstäubung des Kraftstoffs eine „Zerstäubungspumpe“ zu verwenden. Die als Skizze erhalten gebliebene Benzinpumpe sollte einen Pumpenstempeldurchmesser von 2 mm und einen Hub von 7 mm erhalten und die Saug- sowie Druckleitung durch einen Flachschieber gesteuert werden.

Weitere Meilensteine in der Entwicklung von Saugrohreinspritzsystemen markieren gemäß [3] der serienmäßige Bau von Stationärmotoren durch die Firma Deutz mit Saugrohr-Benzineinspritzung in den Jahren 1898/1901, der Beginn der erfolgreichen Verwendung von Saugrohreinspritzsystemen bei Grade-Zweitakt- sowie Antoinette- und Wright-Viertakt-Flugmotoren im Jahr 1906 sowie der Start von Versuchen an Saugrohreinspritzsystemen bei Bosch im Jahr 1912 und Pallas im Jahr 1914.

Erste Untersuchungen zur Kraftstoff-Direkteinspritzung bei Ottomotoren begannen bereits 1898. Das Verfahren von Haselwander [4] hatte einen offenen Brennraum und arbeitete mit Petroleum, **Bild 2.2**. Die Einspritzung des Kraftstoffs erfolgte kurze Zeit vor dem oberen Totpunkt des Kolbens, wodurch eine fette Gemischwolke an die Zündkerze gelangte. Der notwendige Einspritzdruck wurde von einem stufenförmig ausgebildeten Kolben während der Kompression erzeugt. Allerdings scheiterten diese ersten Versuche an den fehlenden technischen Möglichkeiten.

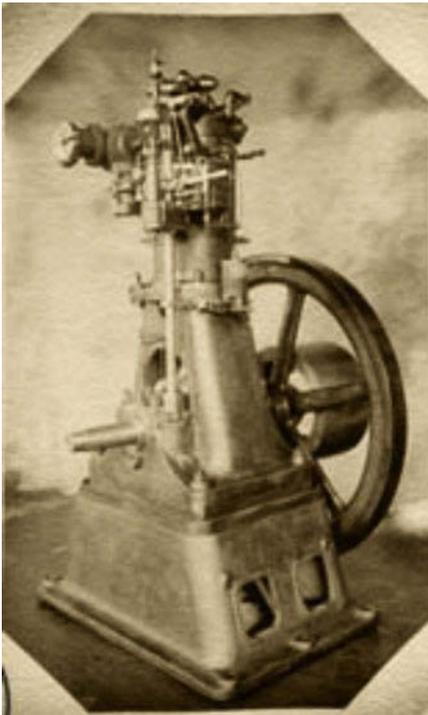


Bild 2.2:
Haselwander-Motor (1898)

Nach Kenntnis des Verfassers wurde die Benzin-Direkteinspritzung erstmalig bei Junkers im Jahr 1916 [5, 6] praktisch verwirklicht. Den Ausgangspunkt für diese Entwicklung stellten bei Junkers im Jahre 1914 die Bestrebungen dar, vor dem Hintergrund der aufkeimenden Luftfahrt- und Motorenindustrie einen wirtschaftlichen, wenig brandgefährdeten Dieselmotor als Flugantrieb zu schaffen. Als Motorkonzept wurde ein liegend angeordneter Zweitakt-Gegenkolbenmotor mit zwei mechanisch gekoppelten Kurbelwellen gewählt, welches sich später in Form der Junkers Flugdieselmotoren Jumo 205 und 207 in Serie bewährt hat. Obwohl man bei Junkers von der Beherrschbarkeit des Dieselfahrens in diesem Motor überzeugt war, blieben Anfang 1915 durchgeführte Versuche mit einem ersten Vierzylinderversuchsmotor (Typ: M 0,3; $V_h = 7,238$ l) weitgehend erfolglos. Unter anderem wegen der technischen Probleme mit dem Dieseleinspritzsystem und der Forderung des Kriegsministeriums nach Benzin- oder Benzolbetrieb bei Flugmotoren basierten alle weiteren Versuche mit Flugmotoren bei Junkers bis zum Kriegsende im Jahr 1918 auf Benzin als Kraftstoff. Basis der Versuche an Benzinmotoren war neben einem entsprechenden Einzylinderaggregat ein neu konstruierter Sechszylindermotor (Typ: M 0,8; $V_h = 14,137$ l), mit dem im November 1915 die Prüfstandserprobung begann. Die zunächst favorisierte Gemischspülung erwies sich wegen fatalen, durch Rückzündungen in das Kurbelgehäuse verursachte Motorschäden als nicht beherrschbar. Aus diesem Grunde entschied man sich bei Junkers für die Einspritzung des Kraftstoffs direkt in den Zylinder des Motors. Diese Entwicklung erfolgte unter der Federführung von Otto Marder. Wegen verschiedener Triebwerksprobleme und des ungünstigen Leistungsgewichts des M-0,8-Motors wurde die Entwicklung im Jahr 1916 mit einem im Hubraum vergrößerten, neu konstruierten Sechszylindermotor (Typ: Fo.2; $V_h = 17,105$ l) und einem entsprechenden Einzylinderversuchsmotor fortgesetzt. **Bild 2.3** zeigt eine Aufnahme dieses Motors in liegender Anordnung. Aus der in **Bild 2.4** dargestellten Schnittdarstellung dieses Motors sind die Position der Einspritzdüse und die Lage der beiden Zündkerzen erkennbar. Durch die tangentiale Ausrichtung der Spül- und Auslasskanäle wird der Verbrennungsluft eine Drallströmung aufgeprägt, welche die Gemischbildung unterstützt.

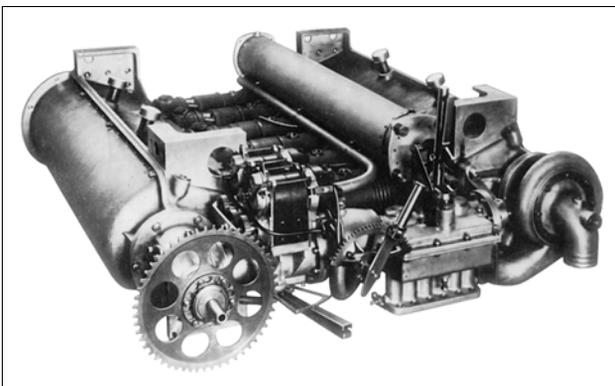


Bild 2.3:
Junkers Fo.2 Motor in liegender Anordnung [Quelle: Deutsches Museum München]

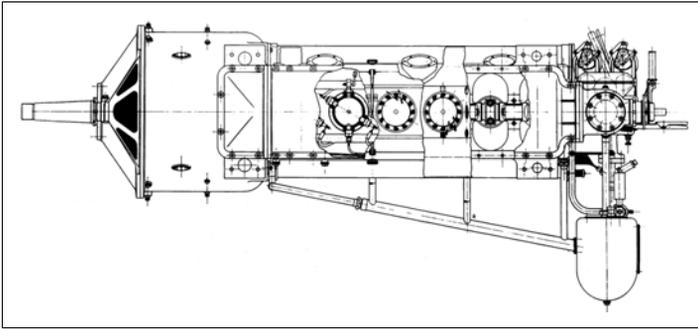


Bild 2.4:
Schnittdarstellung des
Junkers Fo.2-Motors
[6]

Neben den als Schwachstelle bekannten Kolben erwies sich zunächst vor allem die Lastregelung des Motors als äußerst problematisch. Unter Leitung des unermüdlischen Otto Marder gelang es dabei, die Einspritzpumpe in langwierigen Konstruktions- und Versuchsarbeiten zu optimieren. Bereits im Jahr 1917 wurden Junkers Fo.2-Motoren für Schnellboote der damaligen Kriegsmarine serienmäßig mit Benzin-Direkteinspritzung ausgeliefert [6]. Bei den zunächst mit einem Verdichtungsverhältnis von $\varepsilon = 10$ verdichteten Fo.2-Motoren ergaben sich allerdings gravierende Probleme durch die extremen thermischen Belastungen der Zündkerzen, die die Elektroden und die Keramikisolatoren zum Überhitzen brachte. Ein, wenn auch technisch sehr aufwändiger, Lösungsansatz wurde dabei in Form einer Wasserkühlung der Zündkerzen verfolgt. Dieser Teil der Entwicklung wurde von der Firma Bosch übernommen. Die Problematik der Überhitzung der Zündkerzen konnte beim Flugmotor bis Ende 1918 selbst durch die Reduzierung des Verdichtungsverhältnisses auf $\varepsilon = 6$ nicht zufrieden stellend gelöst werden.

Neben den Versuchen am Fo.2-Motor wurde auf Anregung der Flugzeugmeisterei auch ein 260 PS-Mercedes Flugmotor auf Benzin-Direkteinspritzung umgerüstet. Als Einspritzpumpe kam eine Ventilpumpe mit einem maximalen Förderhub von 0,37 cm je Zylinder und Pumpenhub zum Einsatz, die behelfsmäßig auf der Auspuffseite montiert und mittels Kette angetrieben wurde. Die Ergebnisse der mit dem genannten Motor im Sommer 1918 durchgeführten Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen [6]: Der mit dem Einspritzsystem ausgerüstete Motor springt nach Durchdrehen der Einspritzpumpe von Hand im Vergleich zum entsprechenden Vergasermotor besser an. Eine Leerlaufdrehzahl von 300 min^{-1} lässt sich ohne Probleme halten. Die Regelbarkeit der Einspritzmenge ist in allen Lastpunkten gut, das heißt, die Gemischbildung erfolgt ohne Zündaussetzer oder Spätzündungen. Mit entsprechenden Modifikationen am Ansaugsystem konnte mit dem Einspritzmotor gegenüber dem Vergasermotor die Vollastleistung um 15% gesteigert werden.

Im Oktober 1918, kurz vor Einstellung der Entwicklungsarbeiten in Folge des Kriegsendes, wurde dieser Motor Vertretern der Inspektion des Flugwesens vorgeführt. Aus einem aus diesem Anlass von Otto Marder verfasstem Besuchsbericht [5] geht eine weitgehende Beherrschung der Benzin-Direkteinspritzung bei Junkers hervor. Zudem werden in diesem Bericht neben den bereits genannten Vorteilen auch die verminderte Brandgefahr,

die verbesserte Anpassung der Gemischbildung an die jeweilige Flughöhe und der verringerte Bauraumbedarf des Einspritzsystems hervorgehoben.

Unter anderem die bereits mehr als ein Jahrzehnt zuvor bei Junkers nachgewiesenen Vorteile der Benzin-Direkteinspritzung bildeten offenbar auch den Hintergrund dafür, dass sich Anfang der 1930er Jahre in Deutschland wichtige Flugmotorenhersteller im Einvernehmen mit den zuständigen Ministerien auf die Entwicklung der Benzin-Direkteinspritzung konzentrierten. Dabei erwies es sich als förderlich, dass bei Bosch, Junkers und l'Orange auf dem Gebiet der kompressorlosen Dieseleinspritzung bereits entwicklerische Erfahrungen und fertigungstechnisches Know-how bezüglich der genauen Dosierung und Aufbereitung kleiner Kraftstoffmengen vorlagen. Ausgangspunkt dieser Entwicklung zu Beginn der 1930er Jahre war die Beauftragung der deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) in Adlershof zur systematischen Untersuchung der Brennstoffeinspritzung in Zünderflugmotoren durch das damalige Verkehrsministerium. Die Untersuchungen wurden unter Leitung von Kurt Schnauffer zunächst an Einzelzylindermotoren des BMW IV und Siemens Sh 13 sowie einem DKW-Zweitaktmotor durchgeführt. Bei den Versuchen wurden konventionelle Dieseleinspritzpumpen mit Exzenterwellen und Zapfendüsen, teilweise auch Lochdüsen, verwendet. Aus einem von K. Schnauffer verfassten DVL-Bericht vom 01.09.1932 [8], aber auch weiteren DVL-Berichten [3], geht die grundsätzliche Brauchbarkeit der Benzineinspritzung bei Viertakt-Ottomotoren hervor, wobei bei einer Einspritzung in den Saughub bereits bessere Ergebnisse als im Vergaserbetrieb erzielt wurden. Bei Einspritzung des Kraftstoffs in den Verdichtungshub ergaben sich brauchbare Ergebnisse nur bei Verwendung kammerartiger Brennräume. Die Ergebnisse entsprechender Versuche an Zweitaktmotoren waren demgegenüber negativ. In weiteren Versuchen bei der DLR an einen Sechszylinder-Flugmotor BMW Va konnten bis 1934 Mehrleistungen von bis zu 17% und Verbrauchsabsenkungen von zunächst 3% nachgewiesen werden. Diese Erfolge veranlassten im selben Jahr das Reichsluftfahrtministerium dazu, die Flugmotorenindustrie (Argus, BMW, Daimler-Benz, Junkers, Siemens) zu weiteren Entwicklungen und der Serieneinführung der Benzin-Direkteinspritzung zu bewegen. Auf diese Weise wurde in Deutschland in den folgenden Jahren die Entwicklung der Benzin-Direkteinspritzung auf eine sehr breite Basis gestellt, wobei wesentliche entwicklerische Beiträge von den Lieferanten der eigentlichen Einspritzanlagen (Bosch, Deckel, Junkers und l'Orange) sowie den Herstellern von Kraftstofffiltern und Förderpumpen geleistet wurde. Beispielhaft soll hier auf die Entwicklung der Benzin-Direkteinspritzung an Hand der Flugmotoren von Daimler-Benz näher eingegangen werden.

Bei Daimler-Benz wurden im März 1934 die Entwicklungsarbeiten zur Benzin-Direkteinspritzung an einem Einzylinderaggregat des DB 600-Motors auf Basis einer Dieseleinspritzpumpe und zunächst unter Verwendung von Nadeldüsen aufgenommen. Im Laufe der Versuche zeigte sich allerdings, dass es zweckmäßig ist, den Kraftstoff während des Ansaughubs in die Zonen zu spritzen, in denen die stärkste Luftströmung herrscht. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst von l'Orange, später auch mit der Firma Bosch Mehrlochdüsen entwickelt, mit denen im Vergleich zu den zuvor eingesetzten Nadeldüsen eine wesentliche Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und eine Verbesserung der Klopfgrenze erreicht werden konnten.

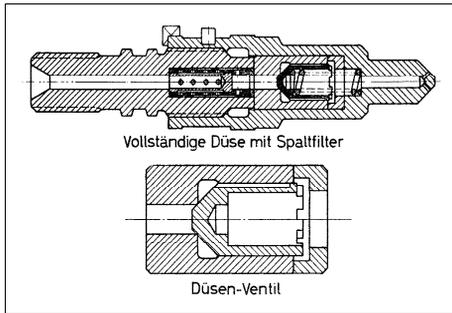


Bild 2.5: Schnitt durch die für Daimler-Benz-Flugmotoren eingesetzte Einspritzdüse l'Orange 9-2261 [3]

Bild 2.5 zeigt einen Schnitt durch die von l'Orange entwickelte Lochdüse. Wegen der Empfindlichkeit der Düse gegen jegliche Verunreinigungen im Kraftstoff wurde in die Einspritzdüse auf Vorschlag von Daimler-Benz ein kleines Spaltfilter integriert.

Das Ergebnis dieser Versuche am Einspritzsystem war unter anderem, dass bei feinsten Filterung des Kraftstoffs im Betrieb mit Benzin oder Benzol keine Probleme mit dem Verschleiß an den Pumpenelementen auftraten. Aus diesem Grunde erwies sich eine zunächst befürchtete, unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung der Klopfestigkeit als unerwünscht angesehene Notwendigkeit der Schmierölmischung zum Kraftstoff als unbegründet. Um einerseits für den Leckkraftstoff eine sicher wirkende Barriere zwischen den Pumpenelementen und dem Nockentrieb der Pumpe zu schaffen, andererseits die Schmierbarkeit an den Pumpenelementen zu erhöhen, wurden von der Firma Bosch Schmierölpumpen mit Leckölsperre nach dem System „Eugen Ludwig Müller“ entwickelt, die sich in der Folge bewährten. **Bild 2.6** zeigt ein Pumpenelement mit Leckölsperre von Bosch, **Bild 2.7** einen Schnitt durch das gesamte Pumpenelement der Bosch-Einspritzpumpe für den DB 603- und den DB 605-Motor. Der Aufbau der Einspritzpumpe ähnelt dem vergleichbarer Dieseleinspritzpumpen. Die Fördermenge wird durch das Verdrehen der Pumpenkolben mittels Zahnstange (Regelstange) variiert. Die Schrägkante am Pumpenkolben ist so gestaltet, dass sich in Abhängigkeit von der Last ein veränderliches Förderende ergibt.

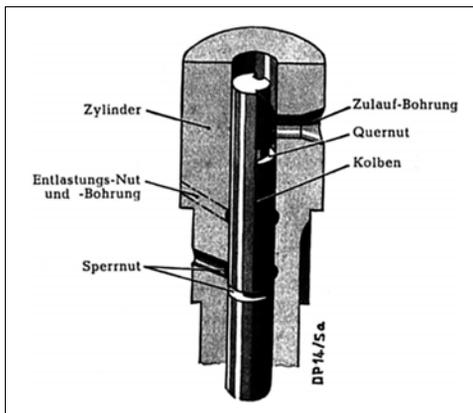


Bild 2.6: Schnitt durch ein Pumpenelement mit Leckölsperre von Bosch [3]

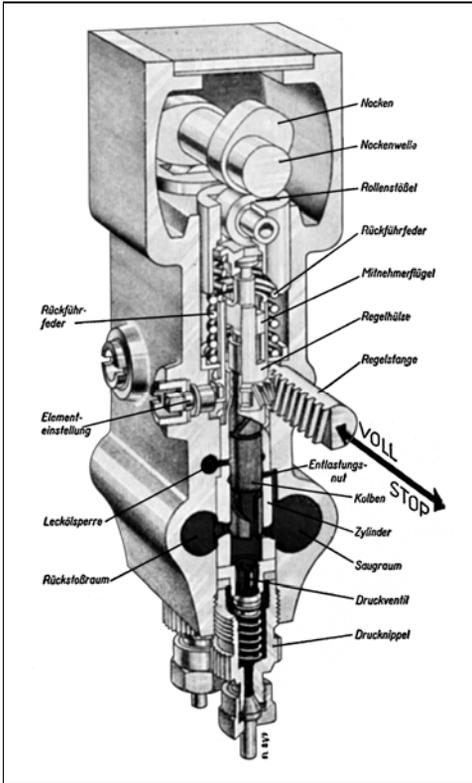


Bild 2.7:
Schnitt durch ein Pumpenelement der Bosch-Einspritzpumpe für den DB 603 und DB 605-Motor [6]

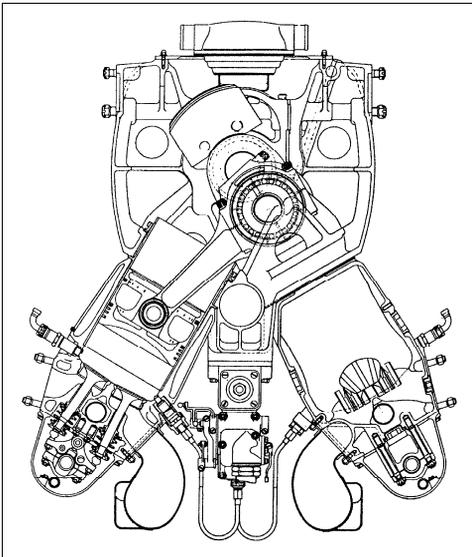


Bild 2.8:
Querschnitt durch den Zwölfzylinderflugmotor DB 601 E von Daimler-Benz mit einem Hubraum von $V_h = 33,8 \text{ l}$ [3]

Im Jahr 1935 begann Hans Scherenberg unter der Leitung von Fritz Nallinger, in enger Zusammenarbeit mit der Firma Bosch, die Benzin-Direkteinspritzung für Flugmotoren bei Daimler-Benz zur Serienreife zu entwickeln. Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten lag dabei in einer sorgfältigen Abstimmung der Gaswechselforgänge, der Verdichtungsverhältnisse, der Ladedrücke und der Ventilsteuerzeiten. **Bild 2.8** zeigt die Anordnung der Einspritzpumpe, der Einspritzdüse und der Zündkerzen am Beispiel eines Querschnitts durch den Daimler-Benz-Flugmotor DB 601, **Bild 2.9** eine entsprechende Darstellung, aus der die Gemischbildungsbedingungen bei den Flugmotoren von Daimler-Benz hervorgehen. Resultat der umfangreichen Untersuchungen am Zwölfzylinder DB 601-Motor ($V_h = 33,8$ l) war, wie in **Bild 2.10** dargestellt, eine gegenüber dem vergleichbaren Vergasermotor erhebliche Steigerung der Leistung bei gleichzeitiger Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs.

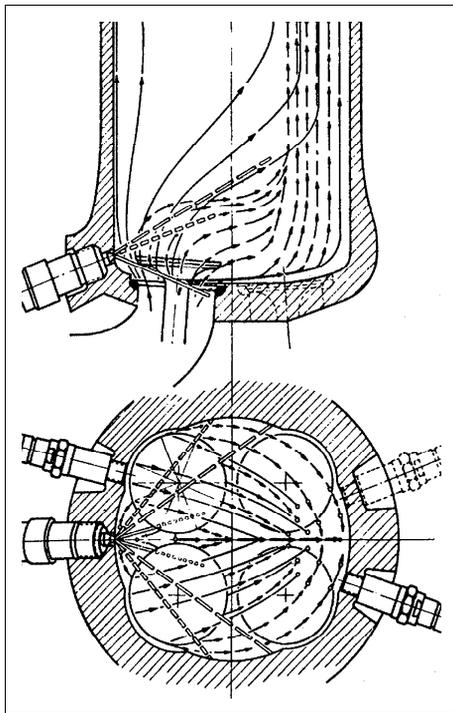


Bild 2.9: Schnittdarstellung des Zylinders des Zwölfzylinderflugmotors DB 601 bzw. DB 603-Motors mit Illustration der Luftbewegung und der Kraftstoffstrahlen [3]

Als erster mit Benzin-Direkteinspritzung ausgerüsteter Flugmotor von Daimler-Benz ging der DB 601 A praktisch zeitgleich mit den ebenfalls mit Benzin-Direkteinspritzung ausgerüsteten Flugmotoren von Junkers Jumo 210 G und dem BMW-Motor 132 F im Jahr 1937 in Serie. In der Folgezeit unterstrichen verschiedene Weltrekorde, wie der absolute Geschwindigkeitsrekord von Hans Dieterle auf einer Heinkel He 100 mit 746,606 km/h am 30. März 1939 und von Fritz Wendel auf einer Messerschmitt Me 209 mit 755,11 km/h am 27. April 1939, das große Potenzial zur Leistungssteigerung

bei Flugmotoren durch den Einsatz der Benzin-Direkteinspritzung. Beide Rekordflugzeuge wurden von einem DB 601 Einspritzmotor angetrieben, bei dem die Leistung insbesondere durch Hochaufladung und Einspritzung von Methanol vor dem Lader auf 1544 kW (2100 PS) gesteigert wurde.

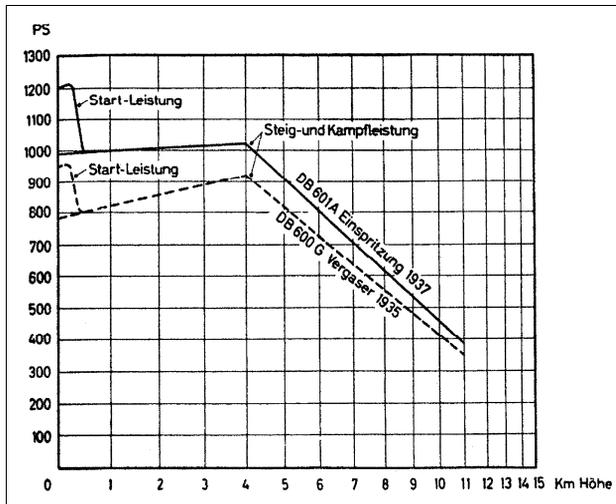


Bild 2.10:
Leistungsvergleich der Daimler-Benz-Flugmotoren DB 600 und DB 601 A
(Stand 1935/1937) [3]

Von der Serieneinführung im Jahr 1937 bis zum Ende der Entwicklungen im Jahr 1945 wurden die Start- und Höhenleistungen der Einspritzflugmotoren schrittweise gravierend gesteigert. Wesentliche Voraussetzung hierfür war die durch die Einspritzung des Kraftstoffs direkt in den Zylinder geschaffene Möglichkeit, große Ventilüberschneidungen zu verwirklichen, ohne dabei, wie bei äußerer Gemischbildung zwangsläufig, große Frischgasverluste in Kauf nehmen zu müssen. Durch eine Ventilüberschneidung zwischen Einspritzbeginn und Auslassende von bis zu mehr als 100° Kurbelwinkel konnte in Verbindung mit den schrittweise für immer größere Flughöhen entwickelten Ladern eine vollständige Restgasausspülung und eine gute Innenkühlung der Zylinder verwirklicht werden. Die großen Ventilüberschneidungen machten allerdings eine sorgfältige Auslegung der Saugrohre erforderlich, da eine Begrenzung der Restgasgehalte in den Zylindern Grundvoraussetzung für ein akzeptables Leerlaufverhalten der Motoren ist. In Verbindung mit der durch die Direkteinspritzung bedingten kurzen Vorreaktionszeiten des Kraftstoffs im Frischgas und der genauen Zumessung des Kraftstoffs auf die einzelnen Zylinder des Motors war es so möglich, vergleichsweise hohe Verdichtungsverhältnisse und allgemein eine Verminderung der Kraftstoffempfindlichkeit der Motoren zu erreichen. Um eine gute Gemischaufbereitung, gleichzeitig jedoch wesentliche Frischgasverluste zu vermeiden, wurde der Kraftstoff mit kurzen Einspritzzeiten kurz nach Schließen der Auslassventile mit einem Druck von ca. 50 bar in die Zylinder gespritzt. In **Bild 2.11** sind die Ventilsteuer- und Einspritzzeiten der Daimler-Benz-Flugmotoren DB 601 A (1937) und DB 601E (ab 1939) gegenübergestellt. **Bild 2.12** zeigt eine Übersicht über die Entwicklung der Höhenleistungen der verschiede-