

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 Schwimmervergasern, bei denen die Ansaugluft durch eine mittels Schwimmer auf konstanter Höhe gehalten

Dr.-Ing. Uwe Meinig (✉)

SHW Automotive GmbH, Enzisholzweg 11, 88427, Bad Schussenried, Deutschland
uwe.meinig@shw.de

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2017

R. van Basshuysen (Hrsg.), *Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung*,
ATZ/MTZ-Fachbuch, DOI 10.1007/978-3-658-12215-7_2

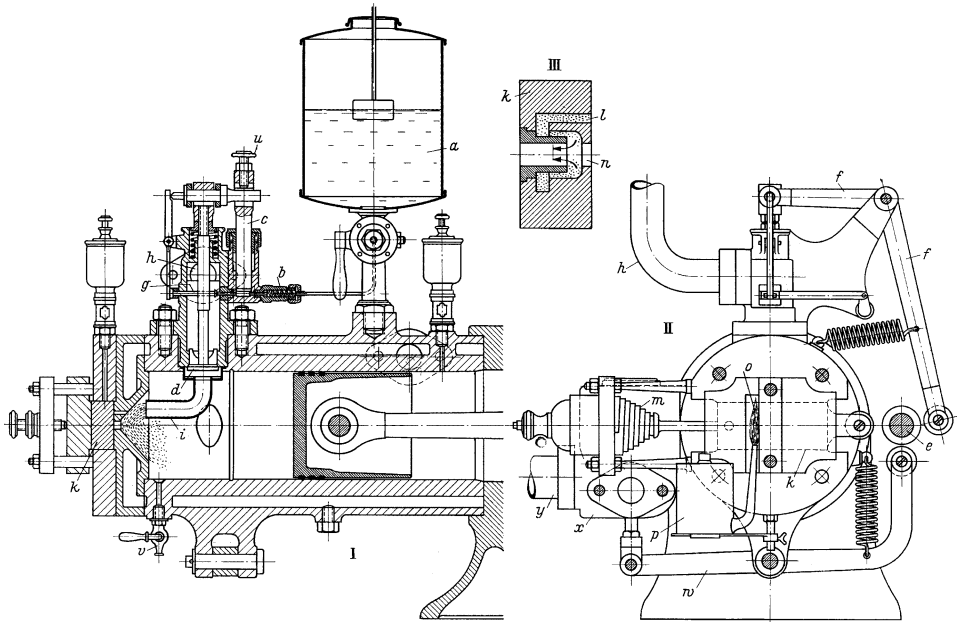


Abb. 2.1 Schnittdarstellung des Benzinmotors von Johannes Spiel aus dem Jahr 1884 mit Einspritzung des Kraftstoffs in das Saugrohr. *a* Benzinbehälter, *b* Saugventil, *c* Stempel der Einspritzpumpe, *d* mechanisch gesteuertes Gemischeinlassventil, *e* Nockenwelle, *f* Winkelhebel, *g* Druckventil der Einspritzpumpe, *h* Luftzuleitung, *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. (Sass [2])

tene 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 Spritzdüsenvergasers 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 Querschnittverringern 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 Halleschen Maschinenfabrik Stationärmotoren mit Kraftstoffeinspritzung hergestellt [2]. Abb. 2.1 zeigt einen Schnitt durch den Zylinder und das Einspritzsystem dieses von Johannes Spiel konstruierten Motors.

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 Verdich-

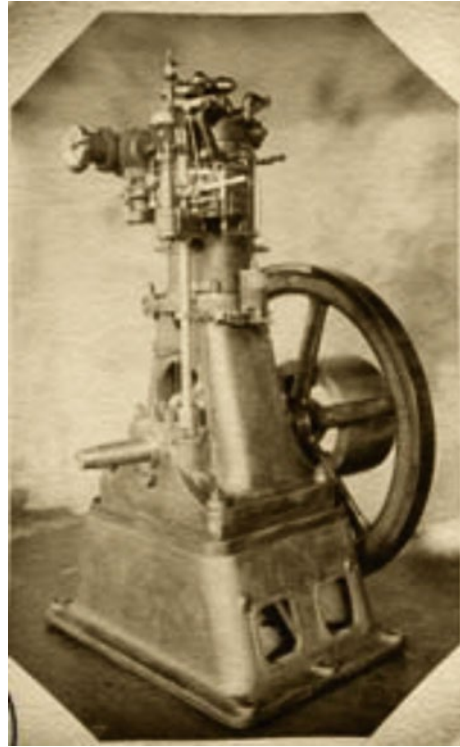
tungshubs des Pumpenkolbens c wird das zuvor angesaugte Benzin durch das Druckventil g in den Ansaugkanal vor das Einlassventil gespritzt. Das im Sinne einer nach außen öffnenden Einspritzdüse wirkende Druckventil der Einspritzpumpe dichtet mit einem konischen Dichtsitz, wodurch ein kegelförmiger Spritzkegel 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, Abb. 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.

Nach Kenntnis des Verfassers wurde die Benzin-Direkteinspritzung erstmalig bei Junkers im Jahr 1916 [5, 6, 7] 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 Dieserverfahrens in diesem Motor überzeugt war, blieben Anfang 1915 durchgeführte Versuche mit einem ersten Vierzylinderversuchsmotor (Typ: M 0,3; $V_h = 7,238\text{ l}$) weitgehend erfolglos. Unter anderem wegen der technischen Probleme mit dem Dieseleinspritzsystem und der Forderung des Kriegsministeriums nach Benzin- oder Benzolbetrieb bei Flugmotoren basierten alle weite-

Abb. 2.2 Haselwander-Motor (1898)

ren 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; $V_h = 14,1371$), 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; $V_h = 17,1051$) und einem entsprechenden Einzylinderversuchsmotor fortgesetzt. Abb. 2.3 zeigt eine Aufnahme dieses Motors in liegender Anordnung. Aus der in Abb. 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.

Neben den als Schwachstelle bekannten Kolben erwies sich zunächst vor allem die Lastregelung des Motors als äußerst problematisch. Unter Leitung des unermüdlichen 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

Abb. 2.3 Junkers Fo.2 Motor in liegender Anordnung. (Quelle: Deutsches Museum München)

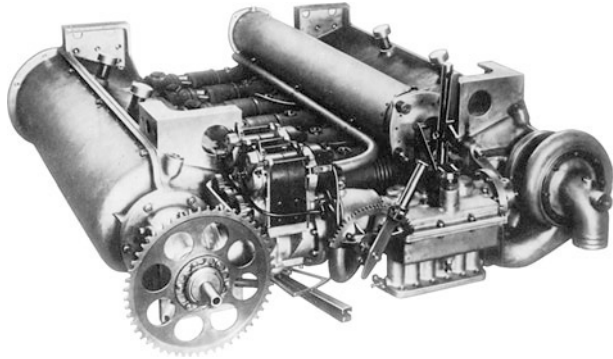
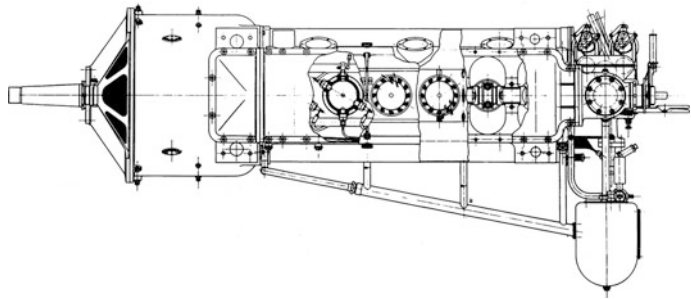


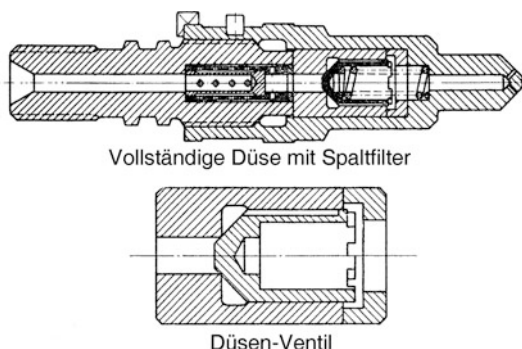
Abb. 2.4 Schnittdarstellung des Junkers Fo.2-Motors. (von Gersdorff und Grasmann [6])



Kriegsmarine in kleiner Serie 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 ccm 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 [5]: 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 Volllastleistung um 15 % gesteigert werden.

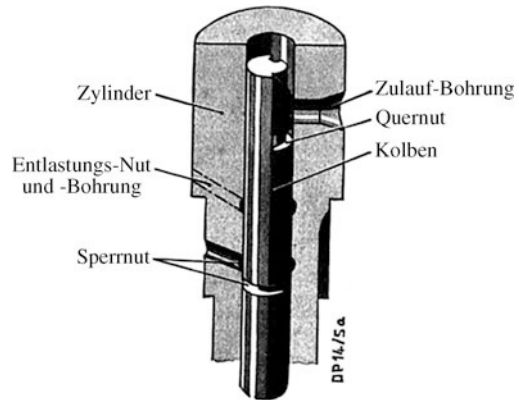
Abb. 2.5 Schnitt durch die für Daimler-Benz-Flugmotoren eingesetzte Einspritzdüse l'Orange 9-2261. (Scherenberg [3])



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 Zündflugmotoren 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,

Abb. 2.6 Schnitt durch ein Pumpenelement mit Leckölsperre von Bosch. (Scherenberg [3])



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.

Abb. 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 Schmierölzumischung 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 Schmierversicherheit 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. Abb. 2.6 zeigt ein Pumpenelement mit Leckölsperre von Bosch, Abb. 2.7 einen Schnitt durch das gesamte Pumpenelement der Bosch-Einspritzpumpe für den DB 603- und

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

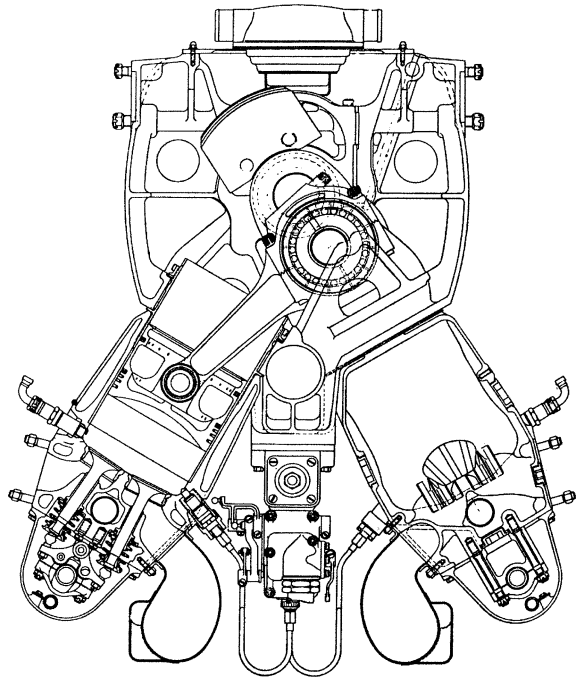


Abb. 2.9 Schnittdarstellung des Zylinders des Zwölfzylinderflugmotors DB 601 bzw. DB 603-Motors mit Illustration der Luftbewegung und der Kraftstoffstrahlen. (Scherenberg [3])

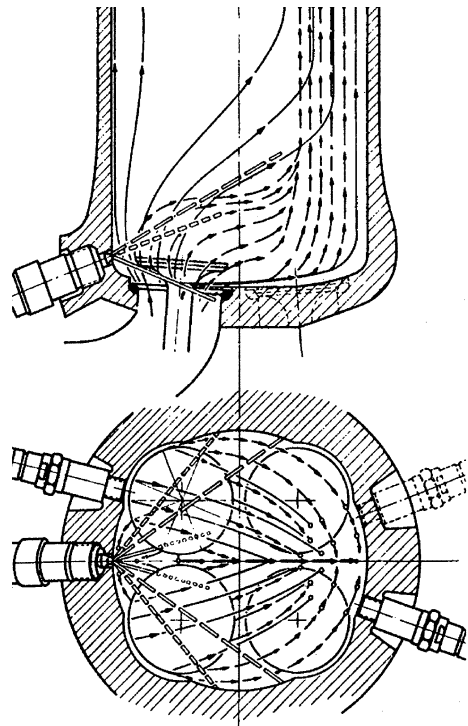
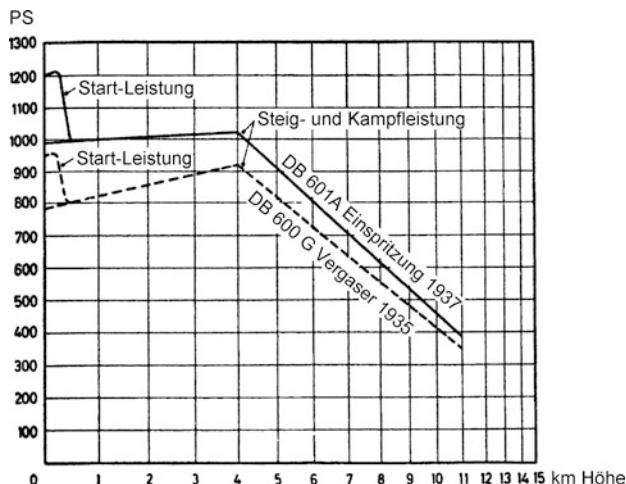


Abb. 2.10 Leistungsvergleich der Daimler-Benz-Flugmotoren DB 600 und DB 601 A (Stand 1935/1937). (Scherenberg [3])



die Gemischbildungsbedingungen bei den Flugmotoren von Daimler-Benz hervorgehen. Resultat der umfangreichen Untersuchungen am Zwölfzylinder DB 601-Motor ($V_h = 33,81$) war, wie in Abb. 2.10 dargestellt, eine gegenüber dem vergleichbaren Vergasermotor erhebliche Steigerung der Leistung bei gleichzeitiger Reduzierung der Kraftstoffverbräuche.

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.

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 Ladem 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

Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung
Ottokraftstoffe, Erdgas, Methan, Wasserstoff
van Basshuysen, R. (Hrsg.)
2017, XXII, 621 S. 598 Abb.,
ISBN: 978-3-658-12215-7