

# Grundlagen aktueller Dieseldieseltechnologie von Kolbentriebwerken für die Luftfahrt



Verband der Luftfahrtsachverständigen/ Technik

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Werner Bauer Helmut Wolfseher

Werden die Grundlagen aktueller Dieseldieseltechnologie dargestellt, wird häufig mit dem Hinweis begonnen, dass Rudolf Diesel 1892 einen Motor entwickeln wollte, der einen signifikant besseren Wirkungsgrad als die damals eingesetzten Motoren hatte. Dieser bessere Wirkungsgrad ist auch die wesentliche, aber nicht die alleinige Voraussetzung für den Einsatz von Dieselmotoren. Der Dieselmotor hat den Nachteil, ein deutlich höheres Motorgewicht als der Ottomotor zu besitzen. Daher wurde er nach anfänglichen Versuchen<sup>1</sup> in der Luftfahrt vom Ottomotor verdrängt.

Die moderne Dieseldieseltechnologie hat u. a. durch Downsizing<sup>2</sup> die Reduzierung von Massen (Gewicht) und Abmessungen des Motors ermöglicht und damit den Einsatz in der Luftfahrt wieder attraktiv gemacht. Dabei kommt dem Dieselmotor sein gegenüber dem Ottomotor geringerer Verbrauch zugute, denn der niedrigere Verbrauch erlaubt bei gleicher Reichweite den Einbau von kleineren Tanks und dadurch liegt, selbst bei höherem Motorgewicht, das Leistungsgewicht aus Motor und Tank des Dieselmotors unter dem des Ottomotors.

Im Unterschied zum klassischen Ottomotor wird beim Verbrennungsverfahren nach Rudolf Diesel kein zündfähiges Luft-Kraftstoffgemisch angesaugt, sondern nur Luft, die im Brennraum hoch verdichtet wird. Die durch annähernd adiabate Kompression verdichtete Luft besitzt eine Temperatur von ca. 600 bis 900 °C und kann daher den Kraftstoff zünden, der kurz vor dem oberen Totpunkt in den Brennraum eingespritzt wird. Die hohe Lufttemperatur ergibt eine hohe Toleranz gegenüber der Zündfähigkeit des Luft-Kraftstoff-Gemischs. Vor allem bleibt die Zündfähigkeit auch bei relativ hohem Flammpunkt des Kraftstoffs

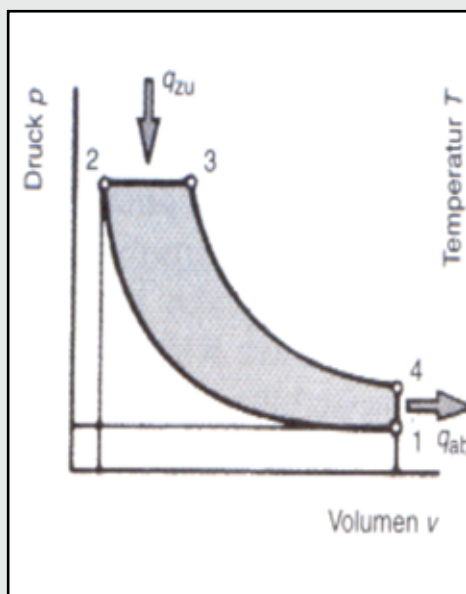
erhalten. Daraus resultiert auch die Viellostofffähigkeit des Dieselmotors.

Gerade für den Privatflieger besitzt der Dieselmotor durch seine Viellostofffähigkeit den Vorteil, dass er neben Diesel, als dem originären Treibstoff des Motors, auch das praktisch auf allen Flughäfen verfügbare Kerosin verwenden kann. Neben der besseren Verfügbarkeit des Kerosins spricht auch ein Kostenvergleich für seinen Einsatz.

Beim Dieselmotor mit Direkteinspritzung wird der Kraftstoff mit hohem Druck in den Brennraum eingespritzt, in dem die verdichtete Verbrennungsluft eine Temperatur von mehr als 600°C besitzt. Durch die hohe Temperatur der Verbrennungsluft wird die Selbstzündung des Kraftstoffs eingeleitet. Den Zeitraum zwischen Beginn der Einspritzung und der Selbstzündung bezeichnet man als Zündverzögerung, während dem der Kraftstoff physikalisch und chemisch aufbereitet wird.

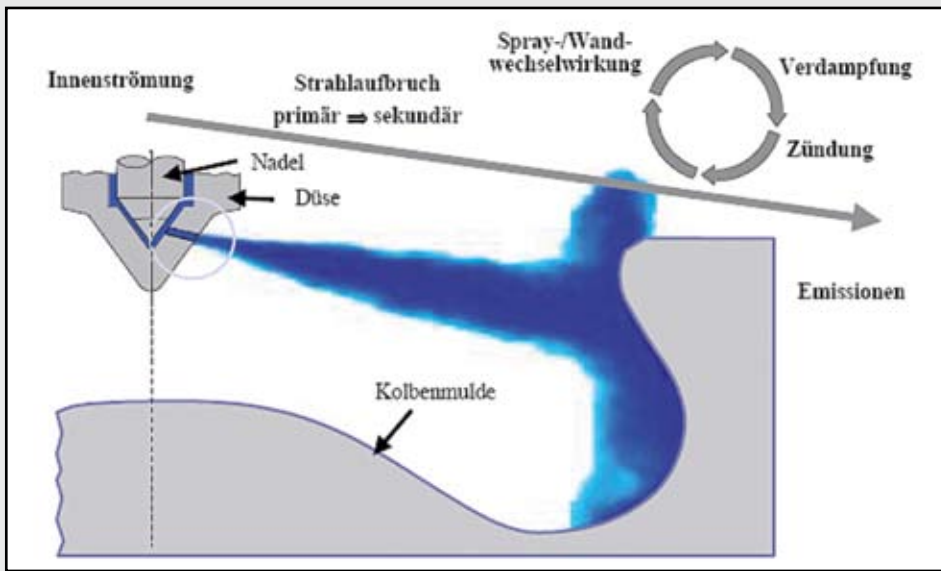
Die stark temperaturabhängige Zündwilligkeit des Kraftstoffs bestimmt den Zündzeitpunkt und die Brenndauer. Da die Temperatur der Verbrennungsluft aus dem hohen Verdichtungsverhältnis resultiert, können insbesondere beim Kaltstart Zündprobleme auftreten, denn bei niedriger Startdrehzahl des Motors beginnt die Verdichtung erst nach Schließen der Einlassventile, also deutlich nach dem unteren Totpunkt. Daher verschlechtert sich das effektive Verdichtungsverhältnis und damit sinkt die Kompressions-temperatur stark ab. Dazu kommt der Wärmeübergang an die kalte Brennraumwand. Diesen Erscheinungen wird beim Start durch den Einsatz von Starthilfen wie z. B. Glühstiften begegnet.

Die Vorgänge der Kraftstoffverdampfung, der Vermischung mit der Luft und der anschließenden Entzündung und nachfolgenden Verbrennung laufen parallel ab.



Der Gleichdruckprozess ist der Vergleichsprozess für den Dieselmotor. Im ersten Schritt des Gleichdruckprozesses wird die angesaugte Luft adiabatisch komprimiert (1/2) und kurz vor dem oberen Totpunkt, wenn zugleich die Zündtemperatur erreicht ist, Kraftstoff eingespritzt. Der Kraftstoff verbrennt mit isobarer Expansion (2/3) und Wärmezufuhr durch das verbrennende Gemisch. Durch eine adiabatische Expansion (3/4) weicht der Kolben zurück, das Gas kühlt sich ab und es wird Arbeit verrichtet. Durch Wärmeabfuhr wird das Gas isochor abgekühlt (4/1). Dieser Prozess-Schritt wird allerdings im realen Motor durch das Ausstoßen der Verbrennungsgase und das Ansaugen neuer Luft ersetzt.

Schematische Darstellung des Gleichdruckprozesses



Schematische Darstellung der Kraftstoffinjektion<sup>3</sup>

Eine ausreichend hohe Reaktionsgeschwindigkeit kann nur erreicht werden, wenn der Kraftstoff hinreichend schnell verdampft und sich mit der Luft vermischt. Die Verdampfung wird neben der Umgebungstemperatur wesentlich von der Durchmischung von Kraftstoff und Verbrennungsluft sowie durch die entstehende Turbulenz beeinflusst. Da bei direkt-einspritzenden kleinvolumigen Dieselmotoren die Strahllänge konstruktionsbedingt kurz ist, wird zur Unterstützung der Durchmischung der Kraftstoff in eine omega-förmige Mulde im Kolbenboden, gespritzt. Zusätzlich wird die Ladungsbewegung so gesteuert, dass im Brennraum ein Drall entsteht, der die Gemischbildung weiter unterstützt. Die Kraftstoffeinspritzung in den Brennraum ist für die Gemischbildung beim Dieselmotor von zentraler Bedeutung. Dabei spielt neben anderen Funktionen insbesondere die Höhe des Einspritzdruckes eine wesentliche Rolle. Bedingt durch die hohen Motordrehzahlen heutiger Dieselmotoren ist die Zeit zur Bereitstellung hoher Gemischbildungsenergie sehr kurz, weshalb hohe Einspritzdrücke erforderlich sind.

Eine vollständig homogene Vermischung des eingespritzten Kraftstoffs mit der Luft ist vor oder während der Verbrennung nicht möglich. Es entstehen viele lokale Zonen mit fettem als auch magerem Gemisch, welche für die rußende oder auch besonders heiße Verbrennung, die zur Stickoxidbildung führt, verantwortlich ist.

Bei dieser so genannten Gemisch-auf-bereitung lassen sich zwei Phasen unterscheiden. In einer ersten sog. vorgemischten Phase wird während des Zündverzugs ein homogenes Gemisch gebildet, das nach der Selbstzündung sehr rasch verbrennt.

Anschließend findet die Verbrennung mit heterogenem Gemisch statt. Dabei wird die Verbrennungsgeschwindigkeit von der Diffusion zwischen Kraftstoff- und Luft sowie der Verdampfung des Kraftstoffs bestimmt.

Mit Rücksicht auf ein geringes Motorgewicht und die Kosten des Motors soll möglichst viel Leistung aus dem vorgegebenen Hubraum gewonnen werden. Bei hoher Last muss der Motor dafür mit möglichst geringem Luftüberschuss laufen. Um sie zu begrenzen, muss die Kraftstoffmenge bei der verfügbaren Luftmenge und abhängig von der Motordrehzahl genau dosiert werden. Niedriger Luftdruck z. B. in großer Höhe erfordert ebenfalls ein Anpassen der Kraftstoffmenge an das geringere Luftangebot.

Grundsätzlich gilt: je mehr Sauerstoff im Brennraum für die Verbrennung zur Verfügung steht, desto mehr Kraftstoff-Vollastmenge kann eingespritzt werden. Damit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Luftfüllung des Zylinders und der maximal möglichen Motorleistung.

<sup>1</sup> Über die Zwei-Takt Dieselmotoren von Junkers berichten K. von Gersdorf et al. in „Flugmotoren und Strahltriebwerke“.

<sup>2</sup> Unter Downsizing versteht man die Reduzierung des Hubvolumens von Verbrennungsmotoren bei gleich bleibender Motorleistung.

<sup>3</sup> Quelle: J. Walther, „Quantitative Untersuchungen der Innenströmung in kavitierenden Dieseleinspritzdüsen“

→ Fortsetzung auf Seite 20

**Claus-Dieter Bäumer, Dipl.-Ing.**  
 von der Handelskammer Hamburg  
 öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger  
 für Schadensbeurteilung und Bewertung von  
 Luftfahrzeugen bis 5,7 t. MTOW  
 Telefon: (+49) 40- 410 21 46  
 Fax: (+49) 40- 44 80 95 89

E-Mail: [claus.baeumer@baeumer-luftfahrt.de](mailto:claus.baeumer@baeumer-luftfahrt.de)

**Klaus-Rudolf Kelber**  
 Diplom-Finanzwirt und Steuerberater

Mandantenorientierte  
 und individuelle Betreuung  
 ist seit 1980 unser Ziel.



**Schwerpunkte:**

- Betreuung von Familienunternehmen
- Luftfahrtbranche
- Rating Advisor
- Unternehmer-Coaching
- Existenzgründungsberatung
- Seminare
- Organisation des Rechnungswesens
- Steuerstrafrecht
- Umwandlung und Nachfolgeregelung

Bergstraße 9a • 24558 Henstedt-Ulzburg  
 Telefon 04193-92073 • Telefax 04193-93277

E-Mail: [Klaus-Rudolf@Kelber-Steuerberater.de](mailto:Klaus-Rudolf@Kelber-Steuerberater.de)  
 Internet: [www.Kelber-Steuerberater.de](http://www.Kelber-Steuerberater.de)

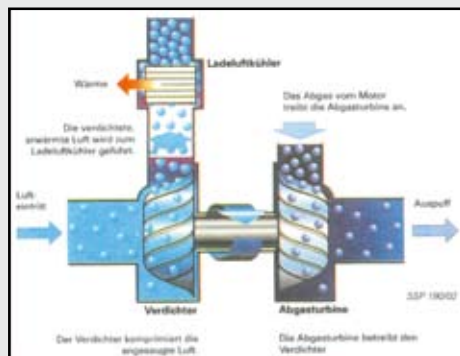


Brennraum eines Diesel-Motors mit Direkteinspritzung<sup>4</sup>

Durch „Aufladung“, d.h. das Verdichten der Luft im Ansaugtrakt, lässt sich die Masse der Verbrennungsluft im Zylinder erhöhen und damit die gewünschte Leistungssteigerung erreichen. Bei Flugmotoren ist die Aufladung schon deshalb erforderlich, um der geringeren Dichte der Luft in der Höhe zu begegnen.<sup>5</sup>

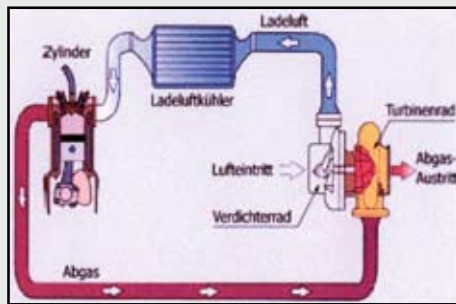
Systeme zur Aufladung sind in den meisten Dieselmotoren zur Leistungssteigerung vorhanden. Zugleich wird bei Aufladung auch eine Verbesserung der Abgasemissionswerte erreicht. Die Aufladung mit einem Abgasturbolader findet die breiteste Anwendung.

Der Turbolader besteht aus einem Verdichter im Ansaugtrakt, der mit einer Turbine im Abgastrakt über eine Welle verbunden ist. Da der Antrieb für den Verdichter über eine Turbine erfolgt, die durch den Abgasstrom angetrieben wird, wird die Energie für die Verdichtung der Ansaugluft dem sonst ungenutzten Abgas entnommen. Im Gegensatz zu Kompressoren und mechanisch oder elektrisch angetriebenen Ladern wird der Motorleistung keine Energie entnommen und der Wirkungsgrad des Gesamtsystems Motor nicht gesenkt. Der Abgasturbolader führt dagegen durch Ausnutzung der Abgasenthalpie zu einer Verringerung der Ansaugverluste und damit zu einer Steigerung des Gesamtwirkungsgrades des Motors.



Schematische Darstellung eines Abgasturboladers mit Ladeflußkühler<sup>6</sup>

Die durch die Verdichtung realisierte Druckerhöhung der Ladeluft hat eine Temperaturerhöhung zur Folge. Die für die Aufladung maßgebliche Dichteerhöhung wird durch die Temperatursteigerung unter die isotherm mögliche Dichte gesenkt. Neben der reduzierten Ladungsmasse bedeutet das erhöhte Temperaturniveau für den Motor eine größere Belastung und zusätzlich wird durch die höhere Verbrennungstemperatur die Bildung von Schadstoffen gesteigert. Diesem Effekt wirkt der Ladeluftkühler im Ansaugtrakt, zwischen Turbolader und Zylindereinlass, entgegen. Die niedrigere Ladelufttemperatur nach dem Kühler führt durch die Dichtesteigerung zu einer verbesserten Zylinderfüllung, damit zu einer höheren Motorleistung und durch die niedrigere Prozesstemperatur zu einem besseren thermischen Wirkungsgrad.



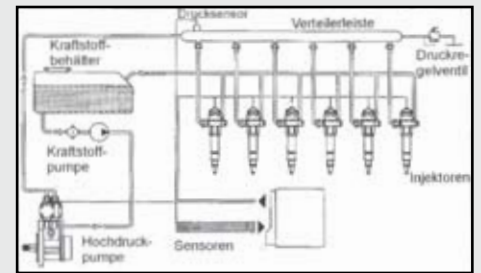
Schematische Darstellung des Luftsystems eines aufgeladenen Dieselmotors

Aufgabe des Einspritzsystems ist es, den Kraftstoff so in den Brennraum zu injizieren, dass eine optimale Verteilung des Kraftstoffs erreicht wird und gleichzeitig die Kraftstoffzuführung zum optimalen Zeitpunkt, also zum exakten Kurbelwellenwinkel erfolgt. Die Strahlführung des direkt in den Zylinder eingebrachten Kraftstoffs ist ein wesentliches Element der Aufbereitung des Kraftstoff-Luft-Gemisches und bestimmt zusammen mit Einspritzdauer und -zeitpunkt wesentlich den Verbrennungsablauf und dessen Wirkungsgrad. Daher kommt dem Einspritzsystem eine zentrale Funktion in der dieselmotorischen Wirkkette zu. Dieses Einspritzsystem wird bei aktuellen PKW-Dieselmotoren als Common-Rail-System ausgeführt.

Das Common-Rail-System besteht in der Regel aus der elektrischen Kraftstoffpumpe (Vorförderpumpe), Hochdruckpumpe, Verteilerrohr (Common-Rail), Raildrucksensor, Druckregelventil und den Injektoren. Die Hochdruckpumpe versorgt die für alle Injektoren gemeinsame Hochdruckleitung (Common-Rail) mit Kraftstoff unter hohem Druck (bis ca. 2000 bar). Sie wird mechanisch vom Motor angetrieben und kostet daher Motorleistung. Da die Hochdruck-

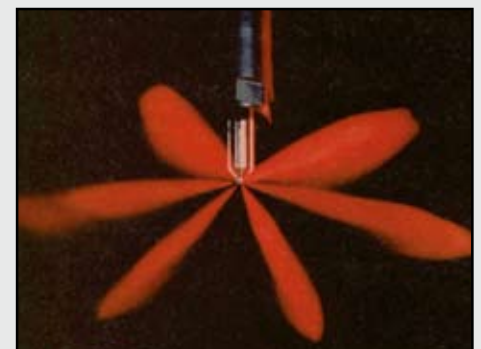
pumpe nicht in der Lage ist, sich selbst mit Kraftstoff aus dem Tank zu versorgen, muss von der elektrischen Vorförderpumpe Kraftstoff mit ausreichendem Volumen und Vorförderdruck zur Verfügung gestellt werden.

Über den Raildrucksensor wird dem Motorsteuergerät der Druck im Rail mitgeteilt, damit es über das Druckregelventil den Raildruck regeln kann. Im Common-Rail-System liegt eine besondere Herausforderung darin, dass der Raildruck beim Einspritzen eines Injektors für die anderen Injektoren nahezu nicht absinkt, denn Druckschwankungen in Leitung und Düse haben wesentlichen Einfluss auf die Spritzmengenstreuungen, Strahlstabilität und den Zerfall des Strahls und damit auf die Gemischbildung. Spritzt ein Injektor ein, entstehen im Rail zwangsläufig Druckschwankungen. Diese Druckschwankungen gleichen moderne elektronische Steuerungen durch Anpassung der Einspritzdauer aus.



Schematische Darstellung eines CommonRail-Systems<sup>7</sup>

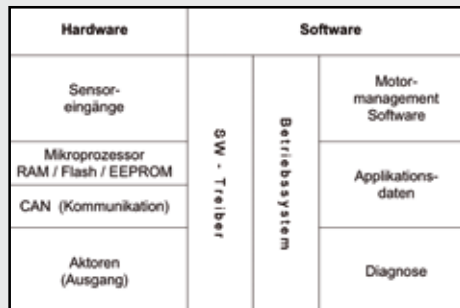
Injektoren für direkt einspritzende Dieselmotoren müssen so gestaltet werden, dass eine optimale Verteilung des Kraftstoffs erzielt wird. Bei Motoren mit Direkteinspritzung kommen daher Mehrlochdüsen zum Einsatz.



Ausbildung der Einspritzstrahlen einer Mehrlochdüse<sup>8</sup>

Die Injektoren müssen extrem kurze Einspritzzeiten von weniger als 1 ms bei Voreinspritzungen<sup>9</sup> und 1 – 2 ms bei der Haupteinspritzung ermöglichen. Sie werden daher mit elektromagnetischen oder piezo-elektrischen<sup>10</sup> Aktoren ausgeführt.

Die Motorsteuerung regelt sowohl Zeitpunkt (Winkelposition der Kurbelwelle), als auch Dauer der Einspritzung. Die Leistung eines Dieselmotors wird über die Menge des eingespritzten Kraftstoffs geregelt.<sup>11</sup> Je nach Leistungsanforderung (Teillast oder Vollast) werden mehrere Einspritzungen vorgenommen. Für die komplexen Funktionalitäten werden intelligente elektronische Steuerungen eingesetzt.



Schematische Darstellung der Komponenten eines CommonRail-Steuergeräts

Die logischen Funktionen der Motorsteuerung werden im Mikrocontroller abgearbeitet. Sie werden von der Software, die sich in einem nichtflüchtigen Speicher befindet, bereitgestellt. Dieser Speicher wird in aktuellen Steuergeräten in Flash-Technologie realisiert. Zur Ausführung des Programmcodes benötigt der Controller einen temporären Speicher, den RAM. In modernen Mikrocontrollern ist dieser RAM als embedded RAM im Controllerbaustein integriert. Die Ein- und Ausgänge zu Sensoren und Aktoren sind analoge bzw. digitale Eingangsstufen bzw. Treiberbausteine. Der CAN-Bus, über den das Motorsteuergerät mit den zahlreichen anderen Steuergeräten eines Fahrzeugs kommuniziert, wird mit Hilfe eines Interface-Bausteins angesteuert.



Motorsteuergerät für einen CommonRail PKW-Dieselmotor<sup>12</sup>

In der Software des Steuergeräts ist die Funktionalität des Motorbetriebs abgebildet. Sie wird durch Softwarefunktionen realisiert, die über applizierbare Parameter an den Zielmotor angepasst werden. Durch diese Funktionen werden die Stellgrößen in Abhängigkeit der von den Sensoren

gemessenen Größen berechnet und über die entsprechenden Leistungsendstufen an einzelne Aktoren (z.B. Einspritzventile) weitergegeben.

Eine wichtige Funktion der Motorsteuerung (insbesondere beim Einsatz in der Luftfahrt) ist die Eigendiagnose, die Störungen an Bauteilen des Steuergeräts, Ausfall oder Fehlfunktionen von Sensoren und Aktoren ermittelt und in einem Fehlerspeicher festhält.

Das Motormanagement ist drehmomentbasiert und stützt sich auf folgende Betriebsdaten:

- Momentenwunsch des Fahrers bzw. Piloten
- Drehzahl, Kurbelwellenwinkel, Nockenwellenstellung
- Temperatur des Kühlmediums
- Ansauglufttemperatur
- Kraftstoffdruck und -temperatur
- Batteriespannung
- Leistungsbedarf der Nebenaggregate<sup>13</sup>

Auf Basis dieser Betriebsdaten werden folgende Motorgrößen direkt geregelt:

- Drehzahl
- Ladedruck
- Raildruck
- Dauer, Menge und Zeitpunkt der Kraftstoffeinspritzung

In einer PKW-Motorsteuerung sind wesentlich mehr Funktionen realisiert als bei einer Steuerung für einen Flugmotor:

Funktionen einer PKW-Motorsteuerung <sup>14</sup>	Funktion eines Flugmotors
Mengenbegrenzung (Kraftstoff)	X
Startmenge	X
Externer Momenteneingriff	X
Fahrgeschwindigkeitsbegrenzung	
Fahrgeschwindigkeitsregelung:	
Höhenkorrektur	X
Ladedruckregelung	X
Leerlaufdrehzahlregelung	X
Enddrehzahlregelung	X
Aktive Rückeldämpfung	
Einlasskanalabschaltung	
Elektronische Wegfahrsperr	
Gesteuerte Voreinspritzung	X
Glühzeitsteuerung	
Starterabwurf	
Klimaabschaltung	
Kühlmittelzusatzheizung	
Laufrihregeleung	
Mengenausgleichsregelung	X
Injektormengenabgleich	X
Lufteransteuerung	
Abgasrückführung	
Nullmengenkalibrierung	
Mengenmittelwertadaption	
Druckwellenkorrektur	X
Lambda-Regelung	

Beim Flugmotor kommt als wesentliche Funktion die Drehzahlregelung in Abhängigkeit der Stellung des Lastwahlhebels<sup>15</sup> hinzu.

Über die Modifikationen, die notwendigerweise vorgenommen werden müssen, um einen PKW-Dieselmotor in der Luftfahrt einzusetzen, wird in einem gesonderten Artikel berichtet.

(Wird fortgesetzt)

<sup>4</sup> Quelle: BMW, „Grundlagen Motorentechnik“

<sup>5</sup> Schon bei den Höhenversionen der JUMO Flugmotoren von Junkers wurde ein Abgasturbolader eingesetzt. Quelle: K.von Gersdorf et al. in „Flugmotoren und Strahltriebwerke“.

<sup>6</sup> Quelle: A. Schwager: „Motoraufladung – Der Abgasturbolader“

<sup>7</sup> Quelle: F. Pischinger et al.; Abschlußbericht, Sonderforschungsbereich 224 „Motorische Verbrennung“

<sup>8</sup> Quelle: Christiani GmbH & Co. KG

<sup>9</sup> Voreinspritzungen werden in modernen Dieselmotoren zur Vermeidung des „Dieselagelns“ im Teillastbereich vorgenommen. Sie bewirken einen „weichen“ Start der Verbrennung.

<sup>10</sup> Piezo-elektrische Injektoren werden in der Luftfahrt noch nicht eingesetzt. Gründe sind sowohl in der Ansteuerung als auch in der noch nicht erprobten Kerosinbeständigkeit zu suchen.

<sup>11</sup> Die Leistung eines konventionellen Ottomotors wird über die Masse des Gemischs aus Verbrennungsluft und Kraftstoff geregelt, die (je Arbeitsspiel) in den Zylinder eingespritzt wird. Daher wird dies als Quantitätsregelung bezeichnet. Von Qualitätsregelung spricht man bei Dieselmotoren und Ottomotoren mit Direkt-einspritzung, bei der die Leistungsregelung allein über die Menge des eingespritzten Kraftstoffs bestimmt wird.

<sup>12</sup> Werksbild Robert Bosch GmbH

<sup>13</sup> z.B. Klimaanlage im Fahrzeug

<sup>14</sup> Quelle: Robert Bosch GmbH, Dieselmotormanagement, S 366 ff

<sup>15</sup> Der Lastwahlhebel (Power Lever) im Flugzeug ersetzt das Gaspedal mit seinem Pedalwertgeber im Auto

Hervorragende Verbindungen zum internationalen Versicherungsmarkt. Umfassende Spezialkenntnisse. Jahrzehntelange Erfahrung. Für eine optimale Absicherung. Angebots-Anforderung online: [www.axelneumann.de](http://www.axelneumann.de)

**AXEL NEUMANN**  
Versicherungsmakler GmbH

Hauptstraße 19, D-72124 Pliezhausen  
Tel. +49 7127-9 75 40, Fax +49 71 27-97 54 44  
info@axelneumann.de

