

# Ist der Betrieb von Diesel-Flugmotoren mit Kerosin problematisch?



Verband der Luftfahrtsachverständigen/ Technik

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

ExxonMobil hat vor dem Betrieb von Diesel-Flugmotoren mit Kerosin gewarnt<sup>1</sup>.

Nachdem Diesel auf den Flugplätzen praktisch nicht verfügbar ist, hätten die Bedenken von ExxonMobil die Forderung zur Konsequenz, alledieselmotorisch angetriebenen Flugzeuge zu grounden. Bringt man diesen Bedenken die nötige Aufmerksamkeit entgegen, ist es erforderlich, sich mit den vorgebrachten Thesen auseinanderzusetzen. Die nähere Betrachtung der Thesen von ExxonMobil bietet darüber hinaus die Möglichkeit, bestimmte Aspekte des Dieselflugmotors<sup>2</sup> detaillierter zu betrachten.

Zunächst beleuchtet ExxonMobil die Tatsache, dass die Produktion von Jet A1 bezüglich der Cetanzahl nicht überwacht wird, und stellt daher die Restartfähigkeit von Dieselflugmotoren in Frage, wenn sie mit Kerosin betrieben werden<sup>3</sup>. Deshalb soll die Bedeutung der Cetanzahl im Rahmen der dieselmotorischen Verbrennung näher betrachtet werden<sup>4</sup>.

Die Cetanzahl ist ein Maß für die Zündwilligkeit des Dieselmotorkraftstoffes und wird von ExxonMobil mit der Oktanzahl von (Flug-) Benzin verglichen. Dieser Vergleich ist sowohl berechtigt wie irreführend. Richtig, da beide eine wesentliche Eigenschaft des Kraftstoffes beschreiben, irreführend, da es konträre Eigenschaften sind. Die Oktanzahl ist ein Maß für die Klopfestigkeit, d.h. sie gibt an, wie sehr der Kraftstoff der beim Ottomotor unerwünschten Selbstzündung widersteht. Die Cetanzahl beschreibt dagegen die Bereitschaft des Kraftstoffes zu der beim Dieselmotor notwendigen Selbstzündung. Ihre Bedeutung für die Optimierung der dieselmotorischen Verbrennung geht aus der Patentschrift des Dieselmotors unmittelbar hervor:

„Arbeitsverfahren für Verbrennungskraftmaschinen, gekennzeichnet dadurch, daß in einem Cylinder vom Arbeitskolben

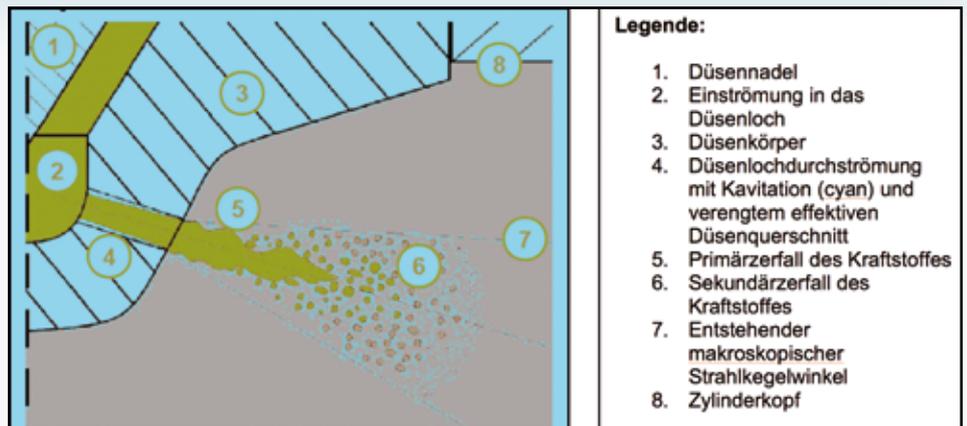


Abb. 1: Schematische Darstellung des Tropfenzerfalls<sup>6</sup>

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, worauf die Brennstoffzufuhr vom toten Punkt ab so allmähig stattfindet, daß die Verbrennung wegen des ausschließenden Kolbens und der dadurch bewirkten Expansion der verdichteten Luft ohne wesentliche Druck- und Temperaturerhöhung erfolgt, worauf nach Abschluß der Brennstoffzufuhr die weitere Expansion der im Arbeitszylinder befindlichen Gasmasse stattfindet.“<sup>5</sup>

Wie in der Patentschrift beschrieben, wird der Kraftstoff bei der dieselmotorischen Verbrennung durch die hohe Temperatur der komprimierten Luft im Zylinderraum entzündet. Dies geschieht auch bei wenig zündwilligem Kraftstoff, wenn er aufbereitet, d.h. ein zündfähiges Gemisch aus Kraftstoff und Verbrennungsluft entstanden ist. So wurde auch der erste Dieselmotor mit dem äußerst zündunwilligen Benzin realisiert. Daraus darf natürlich nicht gefolgert werden, dass moderne Dieselmotoren mit jedem Kraftstoff betrieben werden dürfen, dessen

Zündtemperatur unterhalb der Temperatur der verdichteten Verbrennungsluft liegt. Die Aufbereitung des Kraftstoffes beginnt mit der Einspritzung in den Brennraum. Den Tropfenzerfall des Kraftstoffes zeigt die schematische Darstellung (Abb. 1).

Der Kraftstoffstrahl wird bei der direkten Einspritzung<sup>7</sup> kurz vor dem oberen Totpunkt (OT) unter hohem Druck in den Brennraum eingespritzt und die zusammenhängende Flüssigkeit zerfällt primär in Ligamente und einzelne Tropfen. Dafür sind neben Turbulenz die Stoffeigenschaften und insbesondere die Trägheitsdifferenz zwischen der Flüssigkeit des Strahls und der Umgebung verantwortlich. Im Bereich des sekundären Zerfalls setzt sich dieser Prozess fort, der Kraftstoff wird unter dem Einfluss von aerodynamischen Kräften weiter aufgefächert, er zerfällt in kleinere Tropfen und verdampft dann unter den im Brennraum herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen. Die Verdunstungsgeschwindigkeit des Kraftstoffes hängt ab von Tropfendurchmesser, Druck und Temperatur im Brennraum und der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Gas im Brennraum sowie den Stoffeigenschaften des eingespritzten Kraftstoffes.

Während dieser eben beschriebenen physikalischen Aufbereitung laufen in der Gasphase und in den Kraftstofftropfen (insbesondere am Tropfenrand) auch chemische Reaktionen ab, die die Selbstzündung vorbereiten. Dieser Vorgang, der als chemische Aufbereitung bezeichnet wird, leitet die Selbstzündung des auf diese Weise gebildeten Kraftstoff-Luft-Gemisches ein und wird als sog. Zündverzögerung bezeichnet.

Der Zündverzögerung wird allgemein beschrieben als die Zeit von einem näher zu definierenden Anfangszustand bis zum Einsetzen der Selbstzündung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches. Die Reaktionsmechanismen von Kraftstoff-Luft-Gemischen sind kompliziert. Selbst für die einfachen Kohlenwasserstoffverbindungen liegen nur teilweise experimentelle Ergebnisse vor. Beim Dieselmotor wird die Zeitspanne zwischen Einspritzbeginn und Zündbeginn als Zündverzögerung definiert. Messtechnisch wird er in den meisten Fällen durch Düsenadelhubindizierung<sup>8</sup> und Zylinderdruckindizierung (Zündbeginn bei Abweichen des Zylinderdrucks vom Kompressionsdruckverlauf) bestimmt.

Während dieser Zündverzögerungszeit findet auch die Einspritzstrahlentwicklung, Erwärmung, Verdampfung und Mischung des Kraftstoffs mit der Verbrennungsluft statt. Die Größenordnung des Zündverzögerung beträgt etwa 0,5 bis 1 msec. In dieser Zeit fällt bereits eine erste Entscheidung bezüglich Kraftstoffverbrauch, Verbrennungsgeräusch, Spitzendruckbelastung sowie Schwarzrauch- und Stickoxidemission eines Dieselmotors. Daher führt ein langer Zündverzögerung infolge der hohen in dieser Zeit eingespritzten Kraftstoffmenge zu hohen Werten für Druckanstieg, Spitzendruck und Spitzentemperatur des Gases im Brennraum.

Die erste Verbrennung wird als vorgemischte Phase bezeichnet, sie erfolgt schlagartig mit hohen Pegeln des Verbrennungsgeräusches und wird allgemein als das sogenannte Nageln oder „Dieselschlag“ bezeichnet. Im Anschluss an diese vorgemischte Phase erfolgt die Diffusions- bzw. Sprayverbrennung des noch nicht aufbereiteten Kraftstoffs. Während dieser Phase wird insbesondere bei hohen Lasten weiter Kraftstoff in das bereits brennende Gemisch eingespritzt und somit die Verbrennungsgeschwindigkeit reduziert.

Mit den hohen Spitzendruckwerten steigt aber auch die mechanische Belastung des Triebwerks. Der Motor wird spürbar lauter

und läuft „rauer“. Gleichzeitig entstehen auch vermehrt Stickoxide, da sie hauptsächlich bei den gleichzeitig entstehenden hohen Gastemperaturen gebildet werden. Motorspezifische Parameter, wie z.B. Verdichtungsverhältnis, Ansaugluft- bzw. Ladeluftzustand, Restgasanteil, Drallgröße, Brennraumform, Einspritzdruck, Einspritzverlauf, Düsenlochzahl, Kraftstofftemperatur und Wandtemperatur-Randbedingungen beeinflussen mehr oder weniger den Zündverzögerung. Kraftstoffseitig bewirkt eine sinkende Cetanzahl, d.h. die geringere Zündwilligkeit, eine Verlängerung des Zündverzögerung und ruft die beschriebenen Reaktionen des Motors hervor.

Mit modernen Common-Rail-Einspritzsystemen und weiteren konstruktiven Hilfsmitteln lässt sich der Zündverzögerung beeinflussen. Beispielsweise durch:

- Einspritzverlaufsformung (Piloteneinspritzung, Mehrfachenspritzung, Booteinspritzung)
- Frei wählbare hohe Einspritzdrücke
- Erhöhung der Düsenlochzahl bei unverändertem Wirkquerschnitt der Düse
- Flexible Mengen und Spritzbeginnregelung
- Präzise Kleinstmengenfähigkeit des Einspritzsystems über die Motorlebensdauer
- Steuerung der Ladungsbewegung durch variablen Drall
- Steuerung der Kühlmitteltemperatur durch Thermomanagement
- Glühstiftsysteme mit Dauerhaltbarkeit
- Steuerung des Restgasanteils im Zylinder
- Ladedruckmanagement

Eine sehr wirksame Einflussnahme auf den Zündverzögerung ist das Verdichtungsverhältnis, das aber nur mit großem Aufwand variabel gestaltet werden kann und derzeit nicht in Serienmotoren ausgeführt ist. Eine präzise Vorhersage einer Zündverzögerungsänderung durch Motorparametervariation ist nach wie vor schwer zu treffen und kann meist nur auf empirischem Wege ermittelt werden.

Um diesen negativen Auswirkungen eines zündunwilligen Kraftstoffes zu begegnen, kann man beispielsweise den Zeitpunkt der Einspritzung nach „spät“<sup>9</sup> verschieben oder durch Voreinspritzung eines kleinen Kraftstoffvolumens die Menge des homogenen Gemischs begrenzen. Diese Maßnahmen seien beispielhaft aufgeführt, um die Möglichkeiten aufzuzeigen, mit denen ein Dieselmotor dem Betrieb mit Kraftstoffen niedriger Cetanzahl wie beispielsweise Kerosin angepasst werden kann.

<sup>1</sup>Mit Datum vom 17.11.2008 hat ExxonMobil in einem Schreiben vor dem Einsatz von Kerosin in Dieselflugmotoren gewarnt.

<sup>2</sup>Im Rahmen dieses Beitrags werden nur Flugmotoren in aktueller Common-Rail-Technologie betrachtet.

<sup>3</sup>ExxonMobil führt aus: „Ignition Quality – in automotive diesel fuel one of the key tests performed on every batch of fuel is the Cetane Number test. This is a measure of the ignition quality of the fuel in the combustion chamber. However this test is not performed on batches of jet fuel. The reason for this is that Cetane Number has no relevance to performance of jet fuel in aviation turbine engines. Just as a minimum octane is listed in the Type Certificate of every spark ignition (avgas) aircraft engine, the minimum cetane needs to be included in the Type Certificate of every diesel aircraft engine. Knowing the minimum cetane value allows the establishment of a restart envelope and the definition of engine start limitations. Again, these limitations cannot be established without knowing the Cetane of the fuel.

The fact that the minimum cetane required to establish airworthiness has not been determined, in combination with the fact that cetane is not measured as part of the jet fuel specification, means that ExxonMobil Aviation cannot guarantee the ignition performance of the jet fuel it supplies and cannot know if the aircraft will be airworthy after fuelling.“ ExxonMobil, 17.11.2008, (AGD-F-Q-002)

<sup>4</sup>Der gesamte dieselmotorische Prozess wurde im Dezemberheft 2008 der „German aviation news“ dargestellt.

<sup>5</sup>Rudolf Diesel meldete am 27. Februar 1892 beim Kaiserlichen Patentamt zu Berlin sein Patent über „Neue rationelle Wärmekraftmaschinen“ an. Das DRP (Deutsches Reichspatent) 67 207 über „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen“ wurde datiert auf den 28. Februar 1892 erteilt.

<sup>6</sup>Quelle: W. Bauer, „Empirisches Modell zur Bestimmung des dynamischen Strahlkegelwinkels bei Diesel-Einspritzdüsen“, Dissertation TU München, 2007

<sup>7</sup>Diese Betrachtung bezieht sich wie die gesamte Artikelserie der Autoren auf aktuelle Dieselmotoren mit Direkteinspritzung und Common-Rail-Technologie.

<sup>8</sup>Unter Indizierung versteht man ein messtechnisches Verfahren zum Erfassen einer Messgröße (A) in Abhängigkeit einer anderen Messgröße (B). Die Messgröße A wird also mit Messgröße B indiziert. In der Motortechnik ist die Zylinderdruckindizierung das bekannteste Indizierverfahren. Dabei wird der im Brennraum herrschende Druck in Abhängigkeit des Kurbelwellenwinkels oder der Zeit (meist zusammen mit anderen Messgrößen) erfasst.

<sup>9</sup>„spät“ bedeutet, dass der Zeitpunkt der Einspritzung näher an den OT bzw. kurz nach den OT gelegt wird. Da durch die Verschiebung nach „spät“ aber gleichzeitig die Zeit für die Aufbereitung des Gemischs verkürzt wird, ist dies beim Kaltstart nicht erwünscht, der Kraftstoff benötigt mehr Zeit für die Aufbereitung und die Einspritzung muss eher nach „früh“ (Richtung „unterer Totpunkt“) verlegt werden. Der Zeitpunkt der Einspritzung kann aber nicht beliebig nach früh verschoben werden, da sich dann flüssiger Kraftstoff an der Brennraumwand niederschlägt und somit nicht mehr der Verbrennung zur Verfügung steht.

→ Fortsetzung auf Seite 26

ExxonMobil hat besonders auf die Start- und Restartfähigkeit eines mit Jet Fuel betriebenen Dieselmotors abgehoben und damit zweifellos eine gegenüber dem laufenden Betrieb problematischere Situation für die Selbstzündung angegeben. Dabei muss der Start am Boden und der Restart in der Luft gesondert betrachtet werden.

Die Verbrennung im Dieselmotor ist auf den Betrieb des warmen Motors optimiert, daher sinkt die Kaltstartfähigkeit eines Dieselmotors mit fallender Motortemperatur. Die Startbereitschaft wird bereits ab einer Motortemperatur von 60°C schlechter und nimmt mit fallender Temperatur deutlich ab. Deshalb werden in der Kaltstart- und Warm-lauf-phase des Motors zur Verbesserung des Zündvorgangs und der Verbrennung zunächst eine Verschiebung des Einspritzzeitpunkts und eine Anpassung des Einspritzvolumens vorgenommen.

Bei tieferen Temperaturen, spätestens ab 0°C, verschlechtert sich das Startverhalten drastisch bis bei tiefen Temperaturen der Motor nicht mehr startet. Deshalb müssen zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der Startqualität ergriffen werden.

Der Kaltstart wird von mehreren Faktoren beeinflusst. z.B.:

- Motorbauart<sup>10</sup> und Zylinderzahl
- Oberflächen- Volumenverhältnis
- Verdichtungsverhältnis
- Starterleistung, Batteriekapazität und Ladezustand
- Einspritzsystem (Hochdruckpumpe und Injektoren)
- Luftführung (zum Startzeitpunkt findet noch keine Aufladung durch den Turbolader statt)
- Ölviskosität und damit Triebwerksreibung
- Reibungsverlust durch das Getriebe

Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht darin, dass im Gegensatz zur automobilen Anwendung beim Flugmotor, bedingt durch den Propeller, der Start unter Last erfolgt. D.h. der Starter muss beim Kaltstart am Boden, über die Leistung zum Start des Motors hinaus, auch das Moment des Propellers überwinden.

Mit sinkender Temperatur steigt die Viskosität von Motoröl und Kraftstoff, d.h. der Reibungsverlust des Triebwerks steigt. Vom Starter muss daher ein höherer Momentenbedarf bereitgestellt werden, so dass die Startdrehzahl und damit auch die Kolbengeschwindigkeit sinkt<sup>12</sup>. Durch die reduzierte Kolbengeschwindigkeit steigen

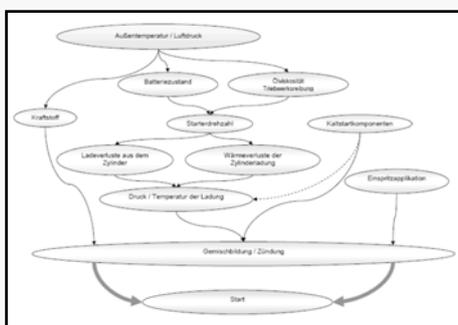


Abb. 2: Die wichtigsten Einflussparameter auf das Kaltstartverhalten<sup>11</sup>

die Blow-by-Verluste<sup>13</sup>, dadurch sinkt der Kompressionsdruck und in Folge auch die Temperatur der verdichteten Verbrennungsluft. Diese Kompressionsendtemperatur wird durch Wärmeverluste an die kalte Zylinderwand weiter reduziert. Die tiefere Kompressionstemperatur kann insbesondere bei Kraftstoffen mit niedriger Cetanzahl die Zündung verhindern. Daher wird die Zündung mit Hilfe einer Glühkerze eingeleitet.

Um die Zündung einzuleiten, wird durch die Zündkerze lokal zusätzliche Wärmeenergie in den Brennraum eingebracht. Ziel dieser Maßnahme ist nicht die Erwärmung des Motors, sondern im Bereich des aufbereiteten, zündfähigen Gemischs die Verbrennung einzuleiten. Die Verbrennung entsteht rund um die Spitze des Glühstiftes an mehreren Stellen gleichzeitig und kann sich damit im Gemisch ausbreiten, „durchzünden“. Nach der Zündung muss bei der Verbrennung soviel Kraftstoff umgesetzt werden, dass die Energieaufnahme durch den sich beschleunigenden Motor ausgeglichen wird.

Konventionell arbeitet man mit 3-Phasenglühtechnik, bei der nach einer Vorglühzzeit für etwa 2 Sekunden das Startglühen durchgeführt wird. Damit die Verbrennung bei den nächsten Zyklen nicht abbricht und ein stabiler Warmlauf erfolgen kann, wird für rund 3 Minuten nachgeglüht.

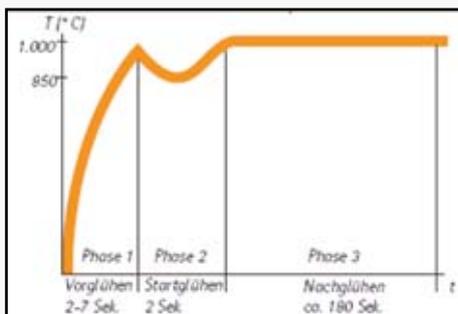


Abb. 3: Schematische Darstellung der 3-Phasenglühtechnik<sup>14</sup>

Da durch die Glühkerze der Brennraum nicht aufgeheizt werden kann, ist die Vorglühzzeit

aus Motorsicht nicht notwendig, daher lässt sich die Vorglühzzeit durch geeignete Glühkerzenkonstruktion verkürzen. Durch elektronisch gesteuerte Glühkerzen mit kleiner thermischer Masse kann die Zündung des kalten Motors bereits nach zwei Sekunden erfolgen.

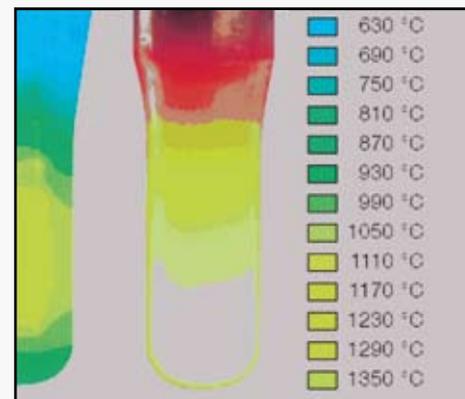


Abb. 4: Temperaturgradienten und Temperaturverteilung nach 2 s Aufheizzeit einer ISS-Glühkerze von BERU<sup>15</sup>

Bei Flugmotoren ist ein Schnellstart ohne spürbare Vorglühzzeit kein Designkriterium. Daher können neben Schnellstartkerzen auch Stabglühkerzen älterer Technologie eingesetzt werden. Bei diesen Glühkerzen dauert die Vorglühzphase länger, da diese Glühkerzen eine größere thermische Masse besitzen, die während des Vorglüzens aufgeheizt werden muss. Um ein Nachglühen zu ermöglichen, müssen nachglühfähige Glühkerzen eingesetzt werden<sup>16</sup>. Die einzelnen Glühphasen sind daher bei den unterschiedlichen Technologien unterschiedlich lang, aber der Glühverlauf ist analog.

Für den Restart des Motors in der Luft ist die Umgebungstemperatur nicht der ausschlaggebende Faktor. Der Motor ist bereits auf Betriebstemperatur und kühlt aufgrund seiner Masse nicht in kurzer Zeit auf Umgebungstemperatur herunter. Größeren Einfluss hat dagegen die Flughöhe, da der Abgasturbolader nicht mehr angetrieben wird. Der Restart in großer Höhe erfolgt daher gegenüber dem Start am Boden mit reduzierter Luftfüllung. Trotzdem bildet sich noch immer ein zündfähiges Gemisch, das auch bei Einsatz von Kraftstoff mit niedriger Cetanzahl mit Hilfe der Glühkerze gezündet werden kann.

Steht der Propeller in Windmilling und nicht in Segelstellung, ergeben sich für den Restart bessere Bedingungen, denn nun wird der Motor in seinem normalen Drehzahlbereich betrieben. Mit der aus diesen Drehzahlen resultierenden Kolbengeschwindigkeit ergeben sich normale Kompressionsverhältnisse.

Selbst ohne Glühkerze werden hierbei auch Gemische mit Kraftstoffen niedrigerer Cetanzahl entzündet.

Die Bestimmung der Cetanzahl oder des Cetanindex von Kerosin in der laufenden Produktion wäre eine zusätzliche Absicherung, so dass entsprechende Überlegungen des ASTM<sup>17</sup> zu begrüßen sind. Da Kerosin in einem engen Fraktionsbereich destilliert wird, sind auch keine gravierenden Schwankungen in der Zündwilligkeit zu erwarten, die einen Betrieb von Dieselmotoren verbieten würden.

Ein weiterer Aspekt des Papiers von ExxonMobil ist der Freezing Point<sup>18</sup> von Kerosin<sup>19</sup>. Man darf vermuten, dass ExxonMobil mit diesem Hinweis auch auf den Unfall der Boeing 777-235ER G-YMMM am 17. Januar 2008 in Heathrow<sup>20</sup> reagiert. Jedoch bedarf auch dieser Hinweis einer näheren Betrachtung. So sollen die Temperaturangaben von ExxonMobil nicht genauer hinterfragt werden, aber auf den en passant eingeführten Freezing Point von AVGAS muss eingegangen werden. AVGAS darf auf keinen Fall zum Betrieb von Dieselmotoren verwendet werden. Seine extreme Zündunwilligkeit (hohe Oktanzahl) und niedrige Viskosität machen es als Kraftstoff für Dieselmotoren ungeeignet.

<sup>15</sup>Quelle: Houben, H. et al., „Das elektronisch gesteuerte Glühsystem ISS für Dieselmotoren“, MTZ Motor-technische Zeitschrift 61 (2000)

<sup>16</sup>Nachglühfähige Glühkerzen verhindern ihre Überhitzung durch Begrenzung des Betriebsstroms. Dieser Selbstschutz funktioniert aber nur bei der für die Glühkerze vorgesehenen Betriebsspannung. Glühkerzen für PKW-Dieselmotoren sind für 14 Volt-Bordnetze ausgelegt, die Bordnetzspannung der General Aviation beträgt dagegen meist 28 Volt. Daher muss die an der Glühkerze anliegende Spannung durch Taktung angepasst werden. Dafür ist ein gewisser Aufwand an Elektronik erforderlich. Mit wenig erhöhtem Aufwand lassen sich auch Schnellstartglühkerzen ansteuern.

<sup>17</sup>ASTM International - American Society for Testing and Materials.

<sup>18</sup>Der Freezing Point bezeichnet den oberen Punkt des Gefrierintervalls und liegt bei Flugkraftstoffen definitionsgemäß 6°C über dem Stockpunkt.

<sup>19</sup>ExxonMobil führt aus: "Freezing Point - studies have shown that the fuel temperature in a piston powered aircraft is essentially the same as the outside air temperature. Unlike turbine powered aircraft, piston powered aircraft do not reach speeds that cause heating of the fuel in the wing due to friction caused by airflow.

High performance pressurized piston powered aircraft essentially fly no higher than about 25,000 feet versus the 40,000 feet of turbine powered aircraft. At these lower altitudes, the outside air temperature rarely gets colder than about -55°C. This is the origin of the -58°C freezing point requirement for avgas used in spark ignition aircraft engines.

Commercial jet fuels have maximum freezing point specifications between -40°C and -47°C. It is therefore possible that an aircraft powered by a diesel engine could reach altitudes where the fuel would begin to freeze in flight, particularly in colder climates where the ground temperature in the winter can be close to the jet fuel freezing point. Whilst the fuel may not freeze solid, other physical properties such as viscosity can change. This may have adverse effects on engine components such as fuel pumps and fuel injectors.

ExxonMobil Aviation is not aware of any flight restrictions, pilot training or information in the Type Certificates or the Pilots Operating Handbooks to address the particular issue." ExxonMobil, 17.1.2008, (AGD-F-Q-002)

<sup>20</sup>Über den gleichzeitigen Ausfall beider Triebwerke liegt mittlerweile ein Zwischenbericht der englischen Air Accidents Investigation Branch vor. Wie aus ihm hervorgeht waren nicht Störungen der elektronischen Turbinensteuerung für den Ausfall verantwortlich, sondern schicht Eisbildungen im Kraftstoff. Der Bericht steht unter folgendem Link zur Verfügung:

[http://www.aaiib.gov.uk/cms\\_resources/G-YMMM%20interi%20Report.pdf](http://www.aaiib.gov.uk/cms_resources/G-YMMM%20interi%20Report.pdf)

<sup>10</sup> Auch hier werden nur Motoren mit Direkteinspritzung betrachtet.

<sup>11</sup> Quelle: R. van Basshuysen und F. Schäfer, „Handbuch Verbrennungsmotor“. Die Verfasser merken an, dass sie auf die Darstellung des Einflusses der Temperatur auf Ladungsverluste (durch die Veränderung der Spaltmaße zwischen Zylinderkolben und -wand sowie die Beeinflussung des Ölfilms) und Kompressionsendtemperatur aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet haben. Die Autoren dieses Artikels schließen sich dieser Entscheidung an.

<sup>12</sup> Die Drehzahl des elektrischen Starters beträgt nur 20 – 30% der Leerlaufdrehzahl des Flugmotors (bei Umgebungstemperaturen von mehr als 0°C).

<sup>13</sup> Als Blow-by-Verluste bezeichnet man die Menge an Verbrennungsluft, die während der Kompressionsphase durch den Spalt zwischen Kolben(ring) und Zylinderwand ins Kurbelgehäuse entweicht.

<sup>14</sup> Quelle: BERU AG, Technische Information 04 „Alles über Glühkerzen“ Ludwigsburg 2005

Leistungsfähige und sichere Funktion hochkomplexer technischer Anlagen und Einrichtungen. Tag für Tag. Jahr für Jahr.

Lange Wege. Komplexe Strukturen. Aufwändige Technik. Enormer Energiebedarf. Strenge Sicherheitsbestimmungen. Flughafen-Projekte sind stets eine besondere Herausforderung für die Elektroinstallation. Dort, wo sich Tag für Tag viele Menschen aufhalten, muss die Funktion von elektrischen Anlagen, Kommunikationseinrichtungen und Datennetzen auch unter extremen Bedingungen gewährleistet sein. Die professionellen Systeme des OBO Cable Management sind für die hohen Anforderungen anspruchsvoller Flughafen-Projekte wie Dortmund, Frankfurt, Athen, Paris, München, Zürich, in vielen deutschen und internationalen Metropolen ausgelegt.



OBO BETTERMANN GmbH & Co. KG  
Kundenservice Deutschland  
Tel. 0237 3/89-1500 · Fax 0 2373/89-7777  
Postfach 1120 · D-58694 Menden  
E-Mail: info@obo.de · www.obo.de



Der Freezing Point von Diesel liegt bei 0°C für Sommerdiesel und ca. -15°C bei Winterdiesel bzw. -25°C bei Spezial Winterdiesel. Somit können Probleme, die durch tiefe Außentemperaturen entstehen, nicht durch den Umstieg von Kerosin auf Diesel gelöst werden. ExxonMobil hält tiefe Kraftstofftemperaturen für eine unvermeidbare und unkontrollierbare Folge der niedrigen Außentemperatur. Als Argument dient dabei die Tatsache, dass bei Fluggeschwindigkeiten, die von Jets erreicht werden, die Erwärmung der aerodynamischen Grenzschicht den Treibstoff in den Tragflächentanks vor dem Erreichen des Gefrierpunkts von Kerosin schützt. An dieser Stelle soll nicht diskutiert werden, ob aus dem Einsatz von Turboprop-Triebwerken im Gegensatz zu Kolbenmotoren auch Reisefluggeschwindigkeiten resultieren, die das Erreichen des Gefrierpunkts des Kerosins verhindern können. Stattdessen sei auf die folgende Eigenart von Common-Rail-Dieselmotoren verwiesen.

Common-Rail-Dieselflugmotoren wirken bauartbedingt dem Absinken der Treibstofftemperatur während des Fluges entgegen. Durch die im Einspritzsystem auftretenden Leckagen und Abstemmungen am hydraulischen Servosystem sowie am Druckregelventil wird durch das Komprimieren und anschließende Entspannen des Kraftstoffes eine Erwärmung des Kraftstoffes im Rücklauf zum Kraftstoffbehälter bewirkt und sorgt somit je nach Füllstand im Tank zu einem mehr oder weniger hohen Kraftstofftemperaturanstieg. Außerdem muss eine Übermenge zur Verfügung gestellt werden, um mit ausreichender Dynamik auf eine Erhöhung der Lastanforderung reagieren zu können. Bei neueren Common-Rail-Einspritzsystemen wird eine saugseitige Mengenregelung der Hochdruckpumpe vorgesehen um die Kraftstoffmenge dem Systembedarf anpassen zu können. Mit dieser Mengenregelung wird nicht nur der Leistungsbedarf der Hochdruckpumpe gesenkt, sondern auch die Kraftstoff-Rücklauftemperatur etwas reduziert. Je nach Bauart und Anordnung des Kraftstoffbehälters muss ähnlich der Anordnung im Kraftfahrzeug ein zusätzlicher Kraftstoffkühler in den Rücklauf integriert werden.

Bis zu welcher Außentemperatur, bei welcher Leistung des Motors die Temperatur im Tank durch den zurückgeführten Kraftstoff noch immer über dem Freezing Point des Kerosins bleibt, müsste für jeden Flugzeugtyp separat ermittelt werden<sup>21</sup>. In der Praxis ist jedoch die in jedem Flugzeug verfügbare Anzeige der Kraftstofftemperatur im Tank als Information für den Piloten ausreichend.

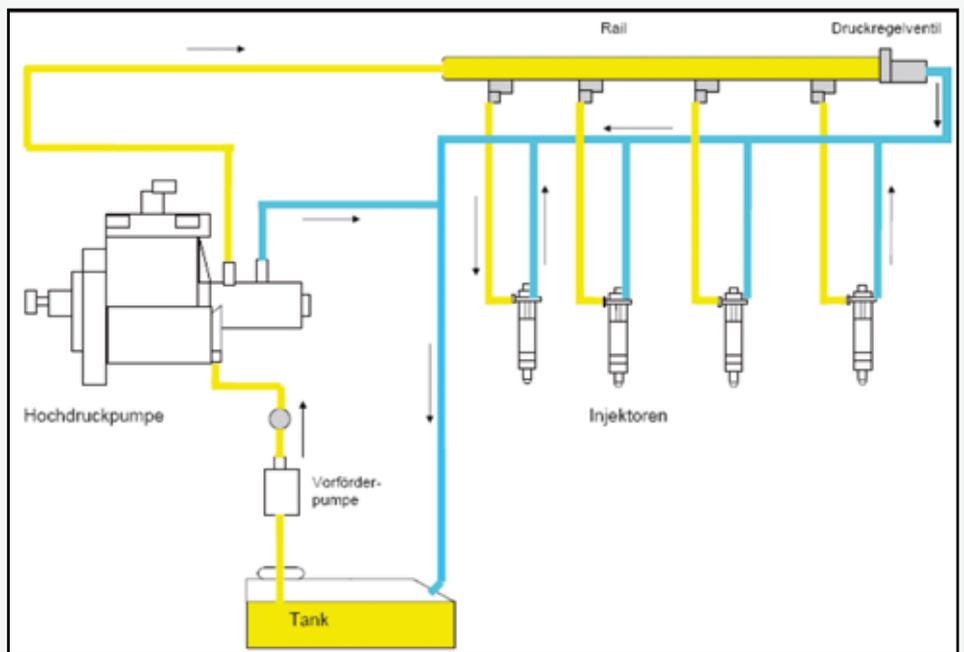


Abb. 5: Schematische Darstellung des Kraftstoffrücklaufs des Common-Rail Systems

Weitere Maßnahmen scheinen für den Einsatz von Kerosin bei niederen Außentemperaturen schon deshalb nicht erforderlich<sup>22</sup>, da die Behörden in den Operating Limitations die untere zulässige Kraftstofftemperatur in einem Bereich definiert hat, der in sicherem Abstand vom Freezing Point des Kerosins liegt<sup>23</sup>.

Zum Schluss führt ExxonMobil die geringere Schmierfähigkeit von Kerosin gegenüber Diesel an<sup>24</sup>. In der Tat spielt die Schmierfähigkeit des Kraftstoffes für die Gestaltung der einzelnen Elemente der Transportkette vom Tank zum Brennraum eine wichtige Rolle. Dabei sind Vorförderpumpe, Hochdruckpumpe und Injektoren von ausschlaggebender Bedeutung.

Die Vorförderpumpe transportiert den Kraftstoff aus dem Tank und stellt ihn der Hochdruckpumpe mit einem Vordruck von 3 – 4 bar zur Verfügung. Mit einem Druck von ca. 1.600 bis 1.800 bar gelangt der Kraftstoff in das Rail und von dort zu den Injektoren. Von diesen Komponenten steht die Hochdruckpumpe im besonderen Focus der Betrachtung, da sie als einzige nicht mehrfach vorhanden ist. Darüber hinaus zeigten in der Vergangenheit manche Hochdruckpumpen ein unerwartetes Verschleißverhalten beim Einsatz von bestimmten Dieselsorten<sup>25</sup>.

<sup>22</sup>Bei dem erwähnten Unfall der Boeing 777 wird inzwischen vermutet, dass sich aus dem im Treibstoff vorhandenen Wasser Eis-kristalle gebildet hätten, die zum Ausfall beider Triebwerke geführt hätten. Zusätzlich verfügen Retrofit-Flugzeuge meist über einen beheizbaren Kraftstofffilter. Diese zusätzliche Erwärmung des Treibstoffes scheint den Autoren beim Einsatz von Diesel sinnvoller als bei Verwendung von Jet Fuel zu sein.

<sup>23</sup>Für die DA 40 von Diamond Aircraft wurde beispielsweise die zulässige untere Fuel Temperature von den Behörden auf -30° C festgelegt.

<sup>24</sup>Lubricity - diesel engines rely on the fuel to lubricate key components of the fuel injection system. With the advent of ultra low sulfur diesel fuels, which have lower inherent lubricity, production batches of automotive diesel fuel are now tested to determine their lubricity. However there is no such requirement in the jet fuel specifications to measure the lubricity of every batch of jet fuel.

Whilst a worst case lubricity fuel is defined for the evaluation of fuel system components used in aviation turbine engines, ExxonMobil Aviation is not aware of lubricity requirements defined in the Type Certificates for diesel aircraft engines. The fuel pump and injectors of current certified diesel aircraft engines are the components most susceptible to fuel lubricity and, to ensure reliability and safety in flight, should be tested in the same fashion as jet engine components (i.e. worst case fuel used during endurance testing).

Consequently ExxonMobil cannot guarantee that lubricity performance of the jet fuel that it supplies will meet the requirements of aviation diesel engines.

<sup>25</sup>Um den Schwefelgehalt des Rohdiesels zu verringern wird er hydriert. Bei der Hydrierung wird aber nicht nur Schwefel (mit guten Schmiereigenschaften) entfernt, sondern es werden auch chemische Doppelverbindungen und Ringe aufgebrochen. Diese chemischen Veränderungen des Rohdiesels erhöhen zwar die Cetanzahl, senken aber gleichzeitig die Schmierfähigkeit. Die gleichzeitige Beimischung von Biodiesel reduziert die Schmiereigenschaften zusätzlich. Diese negativen Folgen versucht man durch Beimischung von Additiven zu vermeiden.

Die Ursache für diese Erscheinung liegt an einer besonderen Form der Schmierung, die elasto-hydrodynamisch genannt wird und an hochbelasteten konvergierenden Gleitflächen auftritt. Bei dieser Form der Schmierung bildet sich im Schmierpalt ein hoher Druck (über 10.000 bar), der die Metalloberflächen elastisch verformt, so dass die Last auf einen größeren Bereich verteilt wird. Von ausschlaggebender Bedeutung ist die Viskositäts-erhöhung des Kraftstoffes aufgrund des hohen Drucks, der im Schmierpalt herrscht und dessen Ausprägung von den Stoffeigenschaften des Kraftstoffes bestimmt wird. Wird die elasto-hydrodynamische Schmierung nicht erreicht, kommt es zur so genannten Mischreibung, die einen erhöhten Verschleiß zur Folge hat.

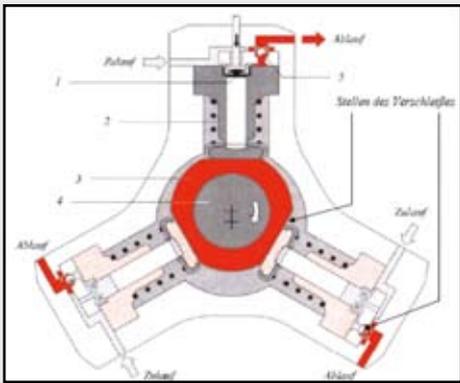


Abb. 6: Schematische Darstellung der Hochdruckpumpe mit den Orten der elasto-hydrodynamischen Schmierung<sup>26</sup>

Um die Standfestigkeit der Hochdruckkomponenten einer Pumpe zu beurteilen, werden von den Herstellern „Pumpentests“ durchgeführt, die Dauerläufe über 500h oder 1000h vorsehen und mit dem konkreten vorgesehenen Kraftstoff, also auch mit Kerosin, durchgeführt werden müssen.

Die Fähigkeit von Diesel zur elasto-hydrodynamischen Schmierung wird durch Kraftstoffeigenschaften bestimmt, die auf chemischen Parametern<sup>27</sup> beruhen. Auf die Entwicklung von modernen Hochdruckpumpen hatten und haben diese Kraftstoff-eigenschaften maßgeblichen Einfluss. Zunächst standen die Auswirkungen von schwefel-armen Dieseldieselkraftstoff auf die Schmierung in elasto-hydrodynamischen Lagern im Focus der Pumpenentwicklung.

Um den Schwefelgehalt auf eine normgerechte Menge zu reduzieren, wird der Rohdiesel hydriert. Mit diesem Verfahren werden nicht nur Schwefel in gasförmigen Schwefelwasserstoff umgewandelt sondern auch die für die Schmierung erforderlichen polaren Verbindungen durch Bildung von Wasser verringert. Darüber hinaus werden Ringe und Doppelverbindungen aufgebrochen, so dass der Anteil von Aromaten

im Diesel reduziert wird, was zwar zu einer Erhöhung der Cetanzahl führt, aber andererseits eine unerwünschte Verringerung der Schmiereigenschaften zur Folge hat.

Eine weitere Herausforderung für die Entwicklung von Dieseldieselkraftstoff stellt die Tatsache dar, dass außerhalb von Europa Ethanol dem Dieseldieselkraftstoff in einem Verhältnis von 7 – 15 % beigemischt wird<sup>28</sup>. Da Ethanol in Diesel nicht löslich ist, müssen zusätzlich Additive verwendet werden<sup>29</sup>. Als Additiv wird u. a. auch Biodiesel in einem Prozentsatz von ca. 5% verwendet.

Diese Maßnahmen haben die Pumpenhersteller gezwungen bei der Entwicklung von Hochdruckpumpen eine größere Varianz in den Kraftstoffeigenschaften zu berücksichtigen<sup>30</sup>. Aus diesem Grund ist es heute nicht unbedingt erforderlich, dass Flugmotorhersteller eigene Entwicklungen von Kerosintauglichen Hochdruckpumpen durchführen, da sie auf moderne Serienpumpen aus der PKW- Motorenfertigung zurückgreifen können<sup>31</sup>.

Selbstverständlich finden sich auch bei den Injektoren Komponenten die einer Schmierung durch Kraftstoff bedürfen. Jedoch hat der Ausfall eines Injektors nicht dieselbe Auswirkung auf den Motor als Gesamtsystem, wie der Ausfall der singulären Hochdruckpumpe. Daher muss auf die Injektoren an dieser Stelle nicht vorrangig eingegangen werden.

Allerdings ist es notwendig, dass die Hochdruckpumpe innerhalb ihrer Spezifikation betrieben wird. Konkret bedeutet dies, dass die Hochdruckpumpe nicht ohne Vordruck betrieben werden darf. Stellt die Vorförderpumpe den Kraftstoff nicht mit ausreichendem Vordruck zur Verfügung, muss die Hochdruckpumpe im Saugbetrieb arbeiten. Im Pumpenraum entstehen dann lokale Druckverhältnisse, die unter dem Dampfdruck des Kraftstoffes liegen. Die dadurch entstehenden Dampfblasen haben eine kurze Lebensdauer, da sich die lokalen Drücke schnell ändern. Diese Kraftstoffdampfblasen implodieren, der so entstehende Hohlraum wird von Kraftstoff gefüllt, der sich dabei auf über Schallgeschwindigkeit beschleunigt und mit seiner hohen Geschwindigkeit auf die umgebende Wand prallt. Durch diese mechanische Überbeanspruchung des Wandmaterials entstehen Grübchen, so genannte Pittings und letztendlich wird das Wandmaterial zerstört. Den Folgen dieser Kavitation genannten Erscheinung ist aufgrund der hohen Energie, die die beschleunigten Kraftstoffteilchen besitzen, auf Dauer kaum mit Beschichtungen oder ähnlichen Maßnahmen zu begegnen.

Wird der Motor mit ausgeschalteter elektronischer Steuerung im Windmilling betrieben, läuft die Hochdruckpumpe weiter, da sie mechanisch vom Motor angetrieben wird. Die Hochdruckpumpe muss im Saugbetrieb arbeiten, wenn beispielsweise die häufig elektrische Vorförderpumpe in diesem Flugzustand ausgeschaltet sein sollte. Schäden, die in diesem Betriebszustand eintreten, müssen nicht den sofortigen Ausfall der Hochdruckpumpe zur Folge haben, sie stellen aber eine Gefahr für den weiteren ordnungsgemäßen Betrieb der Pumpe dar<sup>32</sup>.

Abschließend darf man bemerken, dass es durchaus verdienstvoll ist, dass ExxonMobil vorsorglich Bedenken bezüglich der Verwendung von Kerosin im Flugzeugdieselmotor vorgetragen hat. Dadurch ergab sich der Anlass den Betrieb von Dieselflugmotoren mit Kerosin zu diskutieren. Es zeigt sich, dass die von ExxonMobil vorgebrachten Bedenken sowohl bei der Entwicklung und als auch beim Zulassungsverfahren von Common-Rail-Dieselmotoren für den Einsatz in der Luftfahrt bekannt waren und daher im Gesamtprozess der Entwicklung und Zertifizierung bereits berücksichtigt wurden.

<sup>26</sup>Quelle: Eisen S.-M., „Visualisierung der dieselmotorischen Verbrennung in einer schnellen Kompressionsmaschine“, Dissertation, TU München, 2003. Die Hinweise auf die bevorzugten Stellen des Verschleißes bei Störung der hydrodynamischen Schmierung finden sich bei Prescher K. und Wichmann V., „Auswirkungen des Zusatzes von Rapsölmethylester (RME) auf die Schmierfähigkeit von schwefelarmen Dieseldieselkraftstoff nach DIN EN 590 (neu)“, FKZ:99NR048, Universität Rostock, 2001

<sup>27</sup>Wichtige chemische Parameter sind u.a.: Kettenlänge von Paraffinen, Anteil von Tri- und Di-Aromaten sowie die Anordnung und Anzahl von polaren Ketten (Heteroatomen).

<sup>28</sup>In den USA und Kanada sind diese Diesel-Ethanol-Mischungen unter dem Namen E-Diesel bekannt. In Australien wird er unter der Bezeichnung Diesohol vertrieben und in Brasilien als MAD (Mistura Álcool Diesel) bezeichnet. In China werden dem Diesel aktuell 7% Ethanol beigemischt.

<sup>29</sup>Additive werden auch zur Verbesserung der Schmierfähigkeit und zur Erhöhung der Cetanzahl verwendet.

<sup>30</sup>Ein nicht unerheblicher wirtschaftlicher Anreiz zur Entwicklung von Kerosin beständigen Hochdruckpumpen entsteht durch das Bestreben der NATO für das gesamte Militärgerät in Zukunft ausschließlich Kerosin als Kraftstoff zu verwenden.

<sup>31</sup>Selbstverständlich werden auch eigene bzw. modifizierte Hochdruckpumpen von Flugmotorherstellern eingesetzt.

<sup>32</sup>Es wäre jedoch denkbar für Diesel-Flugmotoren ölgeschmierte Radialkolbenpumpen, wie sie auch bereits in NKW-Systemen eingesetzt werden, zu verwenden. Ölgeschmierte Hochdruckpumpen bieten eine größere Robustheit gegenüber geringerschmierfähigen Kraftstoffen.