

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

**Optimierung der Kraftstoffstrahlausbreitung für Pflanzenöl,  
insbesondere natürliches Rapsöl, bei der Verwendung moderner  
Diesel-Einspritzsysteme**

von

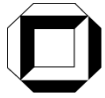
Ulrich Spicher, Markus Lüft

Universität Karlsruhe  
Institut für Kolbenmaschinen

Förderkennzeichen: BWK 25002

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des  
Landes Baden-Württemberg gefördert

Juni 2007



# **Optimierung der Kraftstoffstrahlausbreitung für Pflanzenöl, insbesondere natürliches Rapsöl, bei der Verwendung moderner Diesel-Einspritzsysteme**

Gefördert vom Land Baden Württemberg

durch den Projektträger  
BWPLUS - Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung

Forschungsvorhaben BWK 25002

ABSCHLUSSBERICHT



## 1 INHALTSVERZEICHNIS

1	Inhaltsverzeichnis .....	2
2	Vorwort.....	3
3	Einleitung .....	4
4	Grundlagen .....	5
	4.1 Substitution von fossilen Energieträgern .....	5
	4.2 Herstellung und Eigenschaften von reinem Rapsöl.....	7
	4.3 Betrieb von Dieselmotoren mit Rapsöl.....	11
5	Struktur des gesamten Forschungsvorhabens.....	15
	5.1 Erster Arbeitsblock: Optische Untersuchung der Einspritzstrahlen .....	15
	5.2 Zweiter Arbeitsblock: Untersuchung der Gemischbildung im Einzylinder-Forschungsmotor .	16
	5.3 Dritter Arbeitsblock: Übertragung auf den Vollmotor im Praxisbetrieb .....	17
6	Prüfstand und Messtechnik .....	18
	6.1 Kraftstoffversorgungseinheit .....	18
	6.2 Einspritzkammer / Druckkammer.....	22
	6.3 Optische Messverfahren und Messtechnik.....	23
	6.4 Druckmessung .....	25
	6.5 Temperaturmessung .....	26
	6.6 Datenverarbeitung.....	26
7	Messprogramm .....	27
8	Ergebnisse .....	28
	8.1 Kraftstofftemperaturvariation.....	28
	8.2 Drehzahlvariation .....	40
	8.3 Druckvariation .....	43
	8.4 Einspritzdauervariation .....	45
	8.5 Kammerdruckvariation .....	46
	8.6 Druckverlauf Hochdruckleitung.....	48
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	51
10	Abbildungsverzeichnis.....	54
11	Literaturverzeichnis .....	55
12	Index.....	57

## 2 VORWORT

Der vorliegende Bericht beschreibt die im Rahmen des Projektes „Optimierung der Kraftstoffstrahlausbreitung für Pflanzenöl, insbesondere natürliches Rapsöl, bei der Verwendung moderner Diesel-Einspritzsysteme“ gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse. Die Untersuchungen wurden von Oktober 2005 bis April 2007 am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführt.

Die Autoren danken dem Land Baden-Württemberg für die Förderung dieses Forschungsvorhabens über den Projektträger BWPLUS.

Weiterer Dank gebührt den Projektpartnern Hohenzollerische Landesbahn AG, Hechingen, Südwestdeutsche Verkehrs-Aktiengesellschaft, Lahr und der Ölmühle Donaueschingen GmbH.

### **Anschrift:**

Institut für Kolbenmaschinen  
Universität Karlsruhe (TH)  
Kaiserstraße 12  
76131 Karlsruhe

Projektleiter: Dr.-Ing. Amin Velji  
Telefon: 0721/608-8561  
Fax: 0721/608-8519  
eMail: amin.velji@ifkm.uni-karlsruhe.de

Autor und Projektsachbearbeiter: Dipl.-Ing. Dipl.-Gwl. Markus Lüft  
Telefon: 0721/608-8530  
Fax: 0721/608-8545  
eMail: markus.lueft@ifkm.uni-karlsruhe.de

### 3 EINLEITUNG

Dieselmotoren stellen heute die maßgebliche Antriebsquelle für Fahrzeuge bei Eisenbahnen außerhalb der Hauptstrecken und bei Binnensee-Schifffahrtsbetrieben dar. Gestiegene Kosten für Dieselkraftstoff und Bestrebungen zur Verminderung des Treibhauseffektes durch CO<sub>2</sub>-Emissionen führen zu der Suche nach alternativen Kraftstoffen. Reines Pflanzenöl stellt unter den regenerativen Energiequellen eine sehr sinnvolle Alternative dar. Der CO<sub>2</sub>-Kreislauf ist geschlossen, Pflanzenöl lässt sich sehr unproblematisch lagern und transportieren. Sein Energieinhalt und die Handhabung kommen dem bekannter fossiler Kraftstoffe sehr nahe, und eine Nutzung stillgelegter Ackerflächen bietet der Landwirtschaft in Baden-Württemberg neue wirtschaftliche Absatzmärkte in Form von Rapsöl als Treibstoff.

Bisher nicht voll ausgereift sind die Konzepte zur Nutzung von Rapsöl in serienmäßig hergestellten Dieselmotoren. Rapsöl hat gegenüber Dieselkraftstoff abweichende Stoffeigenschaften. Besonders äußert sich dies in der Viskosität und im Siedeverlauf. Die Ausbreitung und Verdampfung eines Kraftstoffstrahls unterscheidet sich deshalb zwischen den Medien Dieselkraftstoff und Pflanzenöl erheblich. Die Verwendung einer Einspritzrüstung, die für Dieselkraftstoff ausgelegt ist, muss deshalb zwangsläufig zu unzureichender Gemischbildung und damit zu unvollständiger Verbrennung führen. Die Optimierung eines Diesel-Brennverfahrens für Rapsöl kann nur dann erfolgreich gelingen, wenn die Einspritzung auf diesen Kraftstoff abgestimmt ist. Insbesondere zur Gemischbildung mit Pflanzenölen liegen jedoch praktisch keine Erkenntnisse vor. Ziel dieses Vorhabens ist deshalb die genaue Analyse der Strahlausbreitung von Pflanzenöl in einer Einspritzkammer und die anschließende Optimierung der Einspritzung.

Auch unter widrigen Umständen muss eine ausreichende Zerstäubung gewährleistet werden. Grundlage sind deshalb die Kenntnis und die Verbesserung der Strahlausbreitung, die mit dem geplanten Forschungsarbeiten gewonnen werden sollen. Die Strahlausbreitung wird nicht in einem Motor sondern in der Einspritzkammer analysiert, weil diese über großzügig dimensionierte optische Zugänge verfügt. Nur mit diesen Fenstern aus Quarzglas ist eine gute Beobachtung der Einspritzstrahlen möglich. Dieselmotoren werden heute mit modernen Einspritzsystemen wie Pumpe-Düse oder Common-Rail Systemen ausgerüstet, die mit hohem Einspritzdruck arbeiten. Um die Ergebnisse besonders für solche neuen Motoren nutzen zu können, wird für die Einspritzstrahluntersuchung ein modernes Einspritzsystem zum Einsatz kommen. Damit die gewonnenen Erkenntnisse auch auf ältere, in heutigen Fahrzeugen besonders stark verbreitete Systeme (nockengesteuerte Einspritzsysteme) übertragen werden können, wird zusätzlich ein solches Einspritzsystem in die Untersuchungen mit einbezogen.

Erst in einer weiteren, nach diesem Projekt folgenden Phase, werden die Ergebnisse auf die Verbrennung am Motor übertragen und dort validiert. Sie fließen anschließend in die Abstimmung moderner Brennverfahren auf Pflanzenölkraftstoffe ein, die für einen zuverlässigen und schadstoffarmen Betrieb erforderlich ist.

## 4 GRUNDLAGEN

### 4.1 Substitution von fossilen Energieträgern

Der anhaltende Wunsch der Weltbevölkerung nach individueller Mobilität geht einher mit der zunehmenden Verknappung an fossilen Energiereserven und der ansteigenden Belastung der Umwelt.

Die Verkehrsmittel auf der Straße und auf dem Wasser werden praktisch ausnahmslos, solche auf der Schiene zu einem großen Teil direkt von Verbrennungsmotoren angetrieben. Fast alle Verbrennungsmotoren beziehen ihre thermische Energie heute aus der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen. Die Reserven fossiler Kraftstoffe sind begrenzt und nur in sehr geringen Mengen in Deutschland verfügbar. Der Weltmarkt und politische Auseinandersetzungen wirken sich direkt auf den Preis des Kraftstoffs hierzulande aus.

Bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe entsteht in erster Line Wasser ( $H_2O$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ). Das  $CO_2$  ist nach Einschätzung vieler Experten für den Treibhauseffekt unseres Klimas mitverantwortlich. Die Reduktion aller umweltrelevanten Emissionen von Verbrennungsmotoren stellt eine wichtige Herausforderung an die Motorenindustrie dar und wird durch immer schärfere Vorgaben des Gesetzgebers geleitet.

In der aktuellen politischen und gesellschaftlichen Debatte über die Treibhauseffekt steigernden  $CO_2$ -Emissionen spiegelt sich die Brisanz dieses Themas wider. Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, sind aber bei weitem nicht die größten  $CO_2$ -Emittenden. Um den Treibhauseffekt wirkungsvoll einzudämmen, müssen weitere Maßnahmen, zum Beispiel bei der Gebäudeheizung ergriffen werden.

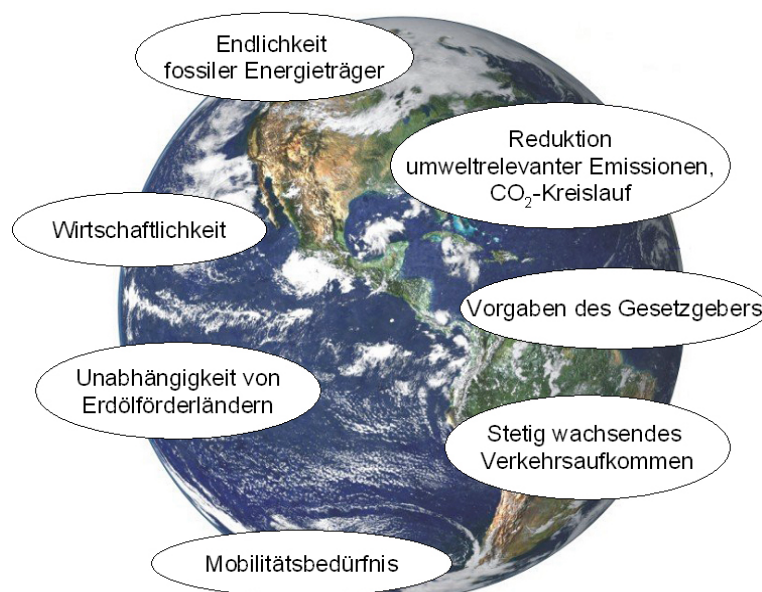


Abbildung 1: Aspekte für biogene Kraftstoffe

Kraftstoffe aus fossilen Energieträgern bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen. Diese wurden über einen langen Zeitraum vor Millionen von Jahren durch Sedimentation organischer Stoffe unter hohem Druck und anschließende Umwandlungsprozesse in dem Energieträger, beispielsweise Erdöl, gebunden. Bei der Verbrennung eines fossilen Kraftstoff, z. B.: Dieseldieselkraftstoff, wird der gebundene Kohlenstoff unter Oxidation mit Sauerstoff in der Luft als Kohlendioxid freigesetzt und gelangt in die Atmosphäre. Eine Wiederaufnahme des Kohlendioxids in einen Kreislauf unterbleibt, vielmehr wird die Konzentration in der Atmosphäre weiter gesteigert. Es bildet sich ein so genannter offener CO<sub>2</sub>-Kreislauf (Abbildung 2).

In den vergangenen Jahren hat die Substitution von fossilem Dieseldieselkraftstoff durch biogene Kraftstoffe kontinuierlich an Bedeutung gewonnen. Biogene Kraftstoffe aus jeglicher Art nachwachsender Biomasse weisen hingegen einen geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf auf. Die Menge des bei der Verbrennung eines solchen Kraftstoffes entstehenden CO<sub>2</sub> wird beim Wachstum der Pflanze wieder aufgenommen. Gegenüber der Atmosphäre ist dieser Kreislauf demnach neutral, wirkt sich also nicht auf den Treibhauseffekt aus.

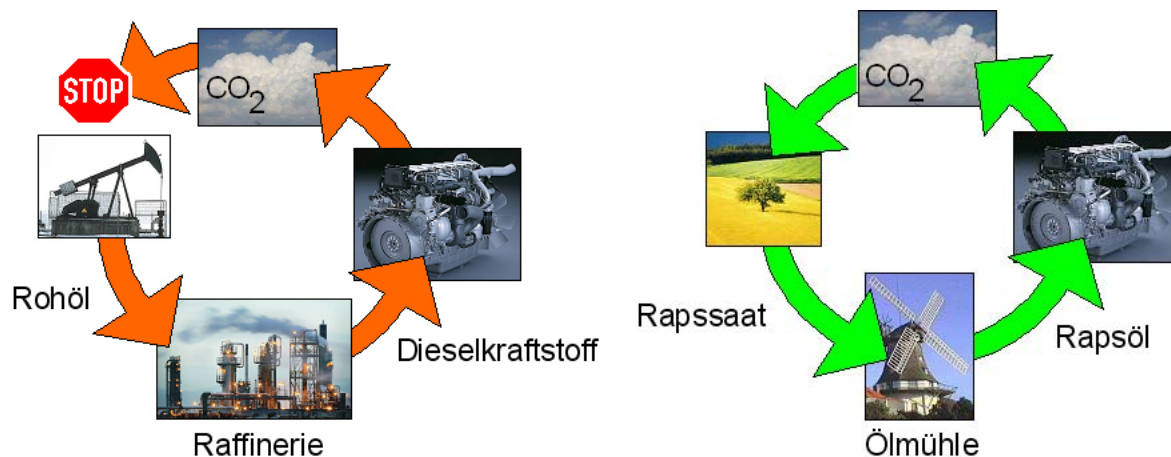


Abbildung 2: Offener CO<sub>2</sub>-Kreislauf fossiler (links) und geschlossener CO<sub>2</sub>-Kreislauf biogener (rechts) Kraftstoffe

Biogene Kraftstoffe lassen sich in zwei Gruppen untergliedern, in die der ersten Generation und die der zweiten Generation. Biogene Kraftstoffe der ersten Generation sind gekennzeichnet durch ihre direkte Herstellung aus Biomasse. Zu den Vertretern zählen [1]:

- Biogas von landwirtschaftlichen Anlagen
- Bioethanol aus Zucker und Stärke produziert aus Getreide
- Rapsmethylester (Biodiesel), mittels Methanol umgeestertes Rapsöl
- Reines Pflanzenöl aus z.B. Rapssaaten

Diese Kraftstoffe sind überwiegend eingeführt und befinden sich, wenn auch teilweise nur in sehr geringem Maße, im praktischen Einsatz. Bei den Kraftstoffen der zweiten Generation handelt es sich um synthetische Kraftstoffe, die über den Weg der Gasphase gewonnen werden. Zum Teil besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die Einsatzreife dieser Kraftstoffe gewährleisten zu können.

Unter anderem gehören

- Bioethanol aus Lignozellulose, d. h. aus Restholz, Gras, Stroh und Abfallprodukten
- Biomass-to-Liquid-Verfahren, die mittels thermochemischer Umwandlung aus jeder Art von Biomasse einen frei definierbaren Kraftstoff herstellen. Beispiele sind das Choren-Verfahren oder das Karlsruher Bioliq-Verfahren.
- Biowasserstoff, mittels regenerativer Wasserstoffproduktion

zu den Vertretern dieser zweiten Gruppe [1].

Bei dem in diesem Forschungsprojekt verwendeten Kraftstoff handelt es sich um reines Pflanzenöl aus Rapssaat. Reines Rapsöl ist auf dem Markt verfügbar. Die Erzeugung von Rapsöl ist geprägt von geringem Energieaufwand und einer günstigen ökologischen Bilanz, da das Rapsstroh dem Boden als Humus wieder zugeführt wird. Sofern es sich um ein Produkt der lokalen Landwirtschaft handelt, ergeben sich weitere Vorteile aus den kurzen Transportwegen zwischen Erzeuger und Verbraucher. Eine Umweltgefährdung beim Tanken oder im Fall von Havarien ist nicht zu erwarten, da sich Pflanzenöle grundwasserneutral verhalten. Ein weiterer Vorteil ist die Vermeidung unnötiger Kuppelprodukte wie beispielsweise Glycerin, das bei der Umesterung von Rapsöl zu Rapsmethylester entsteht.

## 4.2 Herstellung und Eigenschaften von reinem Rapsöl

Pflanzenöl gehört entsprechend der chemischen Zusammensetzung zur Gruppe der Triglyceride und bestehen aus einem dreiwertigen Alkohol Glycerin und ein, zwei oder drei Fettsäuren. Diese unterscheiden sich durch ihre Kettenlänge (üblicherweise 16 – 22 C-Atome) sowie in der Anzahl der Doppelbindungen (Sättigungsgrad) und besitzen einen Carboxylrest.

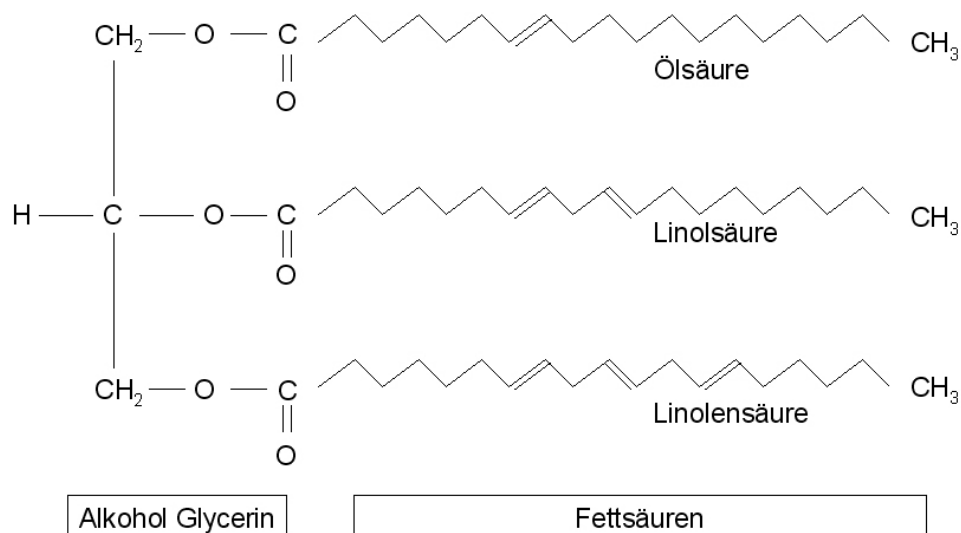


Abbildung 3: Chemischer Aufbau von Rapsöl

Die einfache und im Vergleich zu anderen biogenen Kraftstoffen energiesparende Herstellung [1] von reinem Rapsöl (Abbildung 4) kann unter Berücksichtigung der Reinheitsanforderungen [2] dezentral beim Hersteller der Rapssaat erfolgen.



Pflanzenöl wird durch das Auspressen der stark ölhaltigen Samenkörner der Pflanze gewonnen. Der bei der Pressung entstehende Presskuchen kann nach einer Weiterverarbeitung als eiweißreiches Energiefuttermittel genutzt werden.

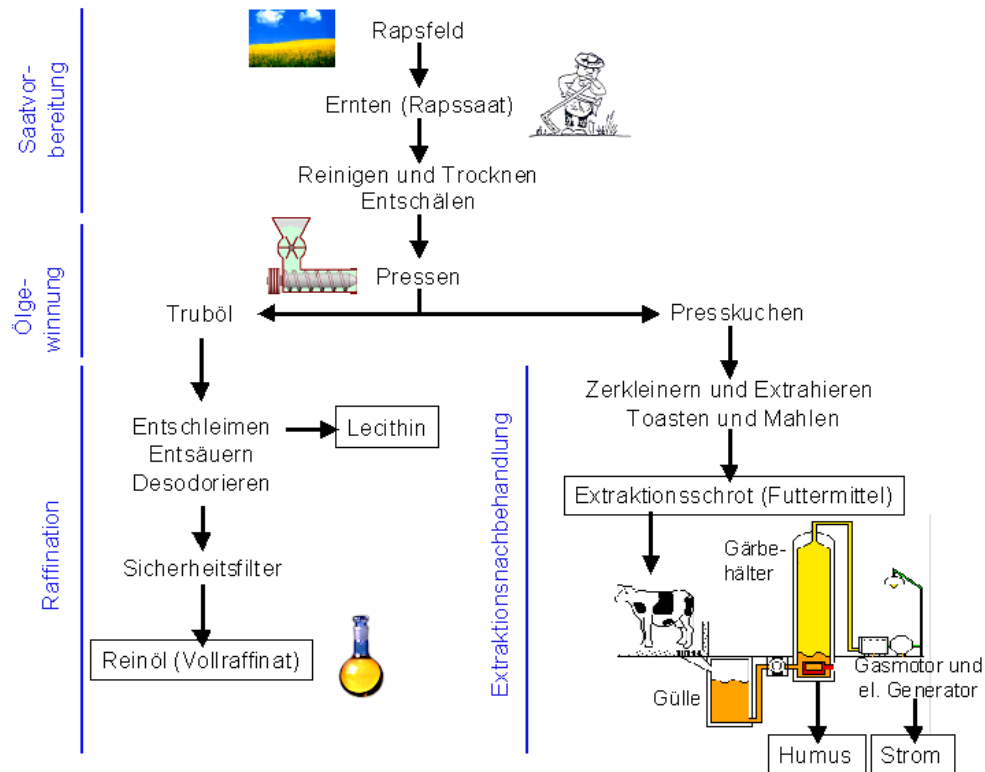


Abbildung 4: Herstellung von Rapsöl

Das Trüböl durchläuft verschiedene Raffinationsstufen, bis es schließlich als Vollraffinat vorliegt und als Kraftstoff genutzt werden kann. Dieser weist die in Abbildung 5 erkennbaren Stoffeigenschaften auf. Die für eine Nutzung als Motorenkraftstoff zulässigen Toleranzen dieser Werte sind seit Jahren im Weihenstephaner Standard fixiert, der ab 2006 in die Vornorm DIN 51605 [2] Eingang gefunden hat.

Anhand der Dichte können verschiedene Pflanzenöle unterschieden werden. Rapsöl weist bei 15 °C eine Dichte von etwa konstant 920 kg/m<sup>3</sup> auf.

Kenngroße	Einheit	Diesel	Rapsöl
Dichte (15°C)	kg/m <sup>3</sup>	835	920
Heizwert H <sub>U</sub>	MJ/kg	42,6	37,7
vol. Heizwert	MJ/dm <sup>3</sup>	35,6	34,7
kin. Viskosität (20°C)	mm <sup>2</sup> /s	3,08	78,7
kin. Viskosität (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	3,2	33,1
Cetanzahl	-	50 - 54	39 - 44
Flammpunkt	°C	64	230
Schwefelgehalt	%	0,035	<0,001

Abbildung 5: Stoffeigenschaften von Rapsöl im Vergleich zu Dieselmotorenkraftstoff [1] [3]

Der Energiegehalt eines Kraftstoffs wird durch dessen Heizwert beschrieben. Rapsöl hat einen unteren Heizwert ( $H_u$ ) von ca. 36 bis 39 MJ/kg, mit einem Mittel von ca. 37,7 MJ/kg. Der für die motorische Verbrennung relevante volumenbezogene Heizwert ist aufgrund der höheren Dichte des Pflanzenöls mit ca. 34,7 MJ/l nur geringfügig kleiner als der von Dieselkraftstoff mit 35,6 MJ/l. Folglich ist der Kraftstoffverbrauch in l/km oder l/h eines mit Pflanzenöl betriebenen Motors annähernd gleich hoch wie beim Betrieb mit Dieselkraftstoff.

Eine hohe kinematische Viskosität verschlechtert die Fließ- und Pumpfähigkeit sowie das Zerstäubungsverhalten des Kraftstoffs. Die kinematische Viskosität beträgt für Rapsöl bei 40 °C rund 33 mm<sup>2</sup>/s und ist damit etwa 10-mal so hoch wie bei Dieselkraftstoff. Die Viskosität von Rapsöl nimmt mit steigender Temperatur ab und erreicht erst bei mehr als 100 °C den Wert von Dieselkraftstoff (Abbildung 6).

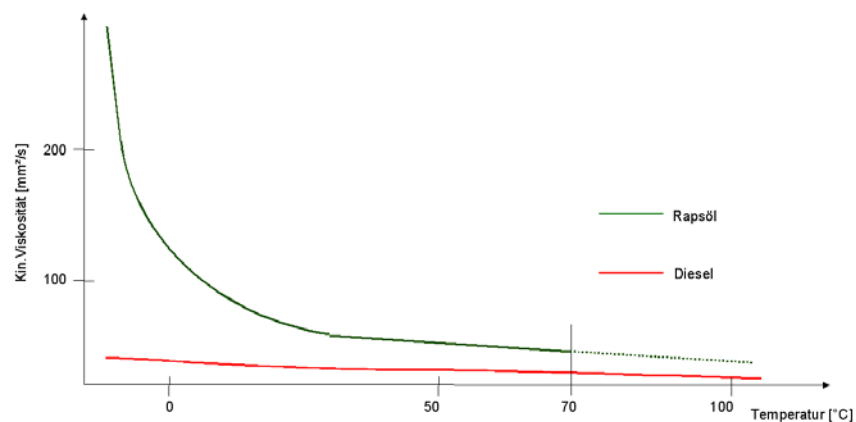


Abbildung 6: Kinematische Viskosität von Dieselkraftstoff und Rapsöl

Die Viskosität wird unter anderem durch die Fettsäuremuster und den Ölalterungsgrad bestimmt, wohingegen sich die Art des Ölgewinnungsverfahrens (Kaltpressung in dezentralen Anlagen, Extraktion und Raffination in zentralen Ölmühlen) nicht auswirkt.

Ab einer Temperatur von 75 °C besteht die Gefahr von Polymerisation; es bilden sich langkettige Moleküle (Polymere). Diese langkettigen Polymere verstopfen Filter und Steuerbohrungen mit kleinem Innendurchmesser und verschlechtern so die Betriebssicherheit des gesamten Systems. Von einer Temperaturerhöhung des Rapsöls über 70 °C sollte deshalb Abstand genommen werden, sofern keine Gegenmaßnahmen durch besondere Additive ergriffen wurden.

Der Flammpunkt ist die Temperatur, bei der selbstentzündende Dämpfe gebildet werden. Der Wert für den Flammpunkt sinkt mit zunehmender Zahl von freien Fettsäuren. Bei Rapsöl beträgt er etwa 230 °C. Dies gewährt eine große Transport- und Lagerungssicherheit, aus diesem Grund werden Pflanzenöle im Gegensatz zu fossilen Kraftstoffen keiner Gefahrenklasse gemäß der Verordnung brennbarer Flüssigkeiten (VbF) zugeordnet [4].

Der höhere Flammpunkt weist auf ein verändertes Siedeverhalten von Rapsöl hin (Abbildung 7). Der Siedebeginn liegt auf einem höheren Temperaturniveau (ca. 300 - 320 °C) und erreicht ein rasches Siedeende bei ca. 350 °C. Bei Dieselkraftstoff beginnen bereits ab etwa 180 °C niedermolekulare Bestandteile zu verdampfen, was sich bis rund 350 °C gleichmäßig fortsetzt. Dadurch wird dem

Verbrennungsmotor rasch ein zündfähiges Gemisch bereitgestellt. Bei Rapsöl hingegen beginnt die Verdampfung erst bei um 40 – 80 °C höheren Temperaturen und führt im Motor zu einer späteren Bereitstellung des zündfähigen Gemischs. Die dadurch begründete schlechtere Gemischbildung bedingt vor allem im Leerlauf und im niedrigen Teillastbereich, mit relativ niedrigen Temperaturen im Brennraum, nicht zufrieden stellendes Entflammen und Durchbrennen des Kraftstoff-Luft-Gemischs.

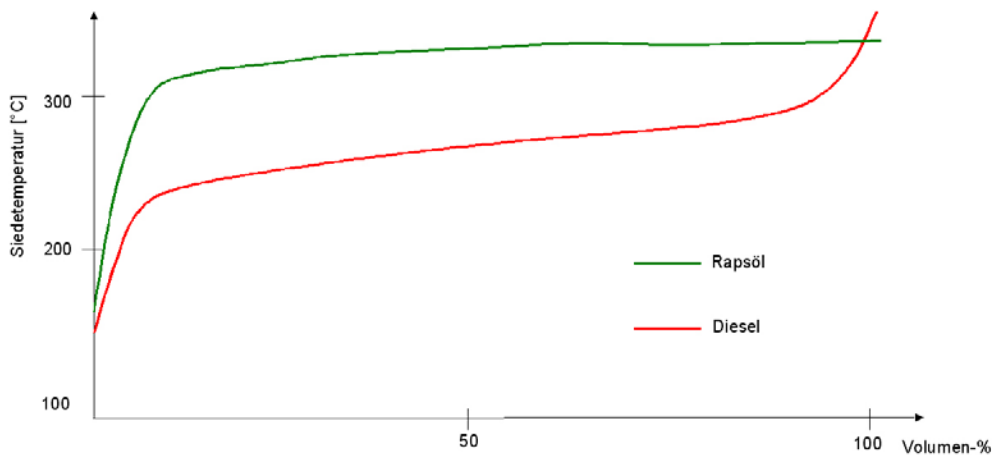


Abbildung 7: Siedelinie von Rapsöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff

Die Gefahr von Verkokungen und einer erhöhten Rußbildung resultiert bei reinem Rapsöl zudem aus Molekülumwandlungsprozessen, die ab etwa 320 °C einsetzen, wenn die Aufheizung des Kraftstoffs - wie im Motor gegeben - entsprechend schnell abläuft [5] [6].

Neben der Viskosität und dem Siedeverhalten bestimmt auch die Oberflächenspannung (Abbildung 8) von Rapsöl die Gemischbildung im Verbrennungsmotor. Bei größerer Oberflächenspannung ist mehr Arbeit zur Vergrößerung der Tropfenoberfläche, also der Erhöhung der Tropfenanzahl und Verkleinerung des Tropfendurchmessers, erforderlich. Die Folge für die Gemischbildung im Brennraum sind größere Tröpfchen des eingespritzten Rapsöls, wenn die für Dieselkraftstoff ausgelegte Einspritzanlage verwendet wird.

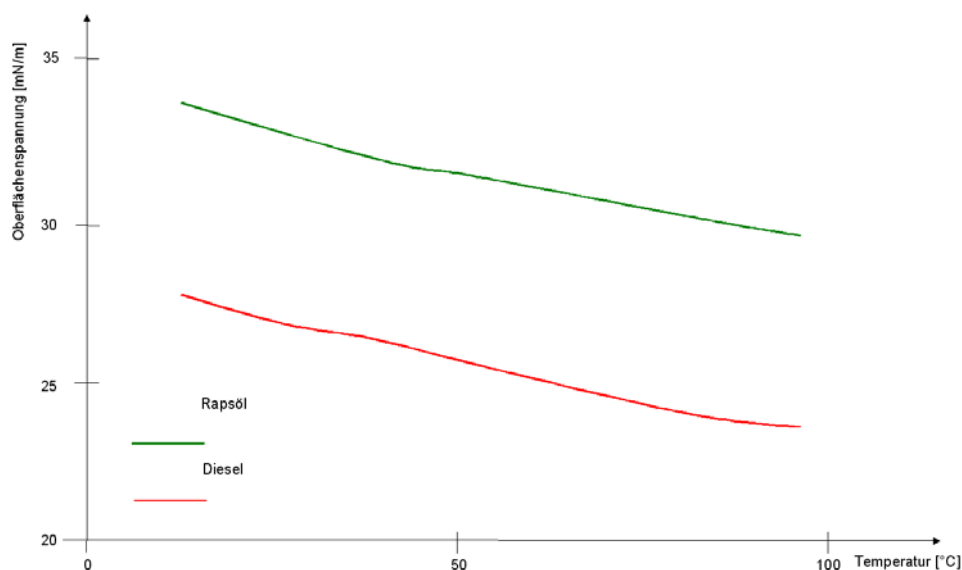


Abbildung 8: Oberflächenspannung von Dieselkraftstoff und Rapsöl

Wegen des sehr niedrigen Schwefelgehalts von Pflanzenöl (weniger als 0,001 Masse-%) werden bei der Verbrennung nur geringe Mengen an  $\text{SO}_x$  und partikelgebundene Sulfate freigesetzt. Schwefelarmer Kraftstoff sichert in Oxidationskatalysatoren langfristig hohe Umsetzungsraten von Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Aldehydemissionen.

### 4.3 Betrieb von Dieselmotoren mit Rapsöl

Ziel dieses Gesamtvorhabens ist der sichere und schadstoffarme Betrieb von Heavy-Duty Dieselmotoren mit modernen Einspritzsystemen mit reinem Rapsöl als Kraftstoff.

Derzeit stellt die Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff einen Nischenmarkt dar. Die landwirtschaftliche Fläche in Deutschland reicht nicht aus, um den gesamten im Land bestehenden Kraftstoffbedarf nur aus Rapsöl zu decken. Um sich vollständig von fossilen Kraftstoffen unabhängig zu machen, müssen verschiedene Lösungsansätze parallel zueinander verfolgt werden.

Für in sich abgeschlossene Betriebe wie beispielsweise öffentliche Verkehrsbetriebe auf der Straße oder der Schiene ist die Verwendung von Rapsöl geradezu ideal. Die Fahrzeuge dieser Anwender verkehren in festgelegten Netzen bzw. Gebieten, sodass die Bereitstellung des Kraftstoffs einfach zu bewerkstelligen ist.

In der Literatur finden sich zahlreiche Berichte und Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Dieselmotoren, die mit Rapsöl betrieben werden. Meist konzentrieren sich diese Untersuchungen auf Motoren, die gar nicht oder nur mit sehr einfachen Maßnahmen auf den Betrieb mit reinem Rapsöl adaptiert wurden. Hierzu zählen verschiedene Verfahren zur Vorwärmung des Kraftstoffs oder einer Spülung des Einspritzsystems mit Dieselmotorkraftstoff vor dem Abstellen des Motors, damit der später folgende Neustart mit Diesel erfolgen kann. Die bei diesen Untersuchungen beobachteten Veränderungen der Emissionen zeigen nicht das volle Potenzial dieses Kraftstoffs, weil die Verbrennung im Motor zu wenig auf die besonderen Belange des Rapsöls abgestimmt wurde. Untersuchungen zu Motoren mit optimiertem Einspritzsystem finden sich in der Literatur fast gar nicht, eine systematische Untersuchung fehlt völlig. Solche Untersuchungen werden als Ausblick aber immer wieder gefordert.

Eine Zusammenfassung bekannter bisheriger Untersuchungen zeigt folgendes Bild:

Verbrennungsmotoren, die für den Betrieb mit reinem Rapsöl entwickelt und ausgelegt sind, werden serienmäßig nicht (mehr) angeboten, allenfalls wird zurzeit über Lösungen für den Agrarbereich diskutiert. Bei der Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff in Dieselmotoren bestehen heute noch einige technische Probleme, durch die die Betriebssicherheit leidet. Die Verwendung von Rapsöl ohne vorherige Umrüstung des Motors findet zwar teilweise statt, kann jedoch zu ernsthaften Motorschäden führen, und hat in manchen Betriebspunkten schlechtere Abgasemissionen zur Folge.

Von elementarer Bedeutung ist die unbedingte Einhaltung des Rapsöl-Qualitätsstandards [1] [2] [10]. Rapsöl-Kraftstoffe, die nicht die Anforderungen der DIN V 51605 erfüllen, führen langfristig zu Schäden an Einspritzsystem und Motor.

Weiterhin bereiten vor allem Ablagerungen (Verkokungen) an Einspritzorganen, Ventilen und Brennraum Probleme hinsichtlich eines störungsfreien Betriebs eines Dieselmotors mit Pflanzenöl. Die Ablagerungen resultieren aus Lackbildnern, die beim Verdampfen von Pflanzenölen freigesetzt werden, aber nicht verbrennen, wenn die Brennraumtemperatur niedrig ist. Sie setzen sich als schwarze, schwer ablösbare Krusten auf besagte Motorenteile ab [6] (Abbildung 9).

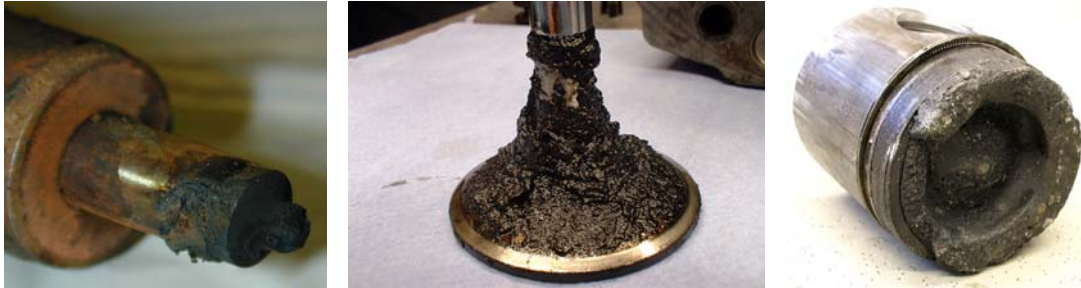


Abbildung 9: Ablagerungen an Einspritzdüse, Einlassventil und Kolben

Durch Ablagerungen am Rand der Düsenlöcher der Einspritzdüse kommt es zu einer deutlichen Verschlechterung des Strahlbildes. Dies führt zur Brennraumwandbenetzung mit der Folge massiven Kraftstoffeintrags in das Motoröl und zu erheblich erhöhten Schadstoffemissionen. Darüber hinaus können schwere Motorschäden durch Verkokungen in sensiblen Spaltbereichen wie beispielsweise am Feuersteg des Kolbens (Abbildung 9, rechts) oder am Ventilschaft hervorgerufen werden.

Kammernmotoren, die vom technischen Standpunkt aus gesehen veraltet sind, weisen eine geringere Störanfälligkeit gegenüber derartigen Ablagerungen auf. Die Aufbereitung des Kraftstoffs in der Vorkammer und vor allem der Überströmvorgang vom Kammerbrennraum in den Hauptbrennraum wirken sich positiv im Hinblick eine gute Gemischbildung aus. Die Qualität des Einspritzstrahls hat bei diesem Brennverfahren wesentlich weniger Einfluss. Nach [7] und [8] wurden diverse Dieselmotoren ohne nennenswerte technische Änderungen mit Pflanzenöl betrieben. Dabei zeigte sich, dass Dieselmotoren mit Kammernverfahren und großen Zylindereinheiten ( $V_h > 1l$ ) für Langzeitbetrieb mit reinem Rapsöl gut geeignet sind. Grundsätzlich muss bei Kammernmotoren lediglich eine ausreichende Vorwärmung des Kraftstoffs gegeben sein, um vor allem die Förderfähigkeit bei tiefen Temperaturen gewährleisten zu können.

Bei Motoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung in den Hauptbrennraum mittelsnockengesteuerter Einspritzsysteme (Reiheneinspritzpumpe, Pumpe-Düse, Steckpumpe) gehen die Erfahrungsberichte weit auseinander. Vielfach werden serienmäßige Motoren mit Direkteinspritzung im Feld durch kleine Maßnahmen an der Peripherie umgebaut, um mit Pflanzenöl betrieben zu werden. Diese Umbauten erstrecken sich nur auf die Vorwärmung des Kraftstoffs und die Spülung der Einspritzleitungen und -ventile mit Dieselmotorkraftstoff vor dem Abstellen des Fahrzeugs (Zwei-Tank-System). Solche Modifikationen sind nur für ein sehr eingeschränktes Nutzungsprofil und nur für bestimmte Motortypen erfolgreich. Sie führen häufig zu schweren Schäden und sind für das Negativeimage dieser Technik mit verantwortlich [9] [10]. Wird die Einspritzanlage nicht entsprechend angepasst, ist zwangsläufig eine mangelhafte Gemischbildung die Folge. Dies umso mehr, als das Brennverfahren auf die

Gemischbildung durch den Einspritzvorgang angewiesen ist. Moderne Motoren werden mit Direkteinspritzung ausgerüstet, um den thermodynamischen Wirkungsgrad zu optimieren. Gerade diese Motoren stellen besonders hohe Anforderungen an eine optimale Kraftstoffeinspritzung, weil im Gegensatz zum Kammermotor die Gemischbildung in erster Linie durch den Einspritzstrahl bewältigt werden muss.

Für den Rapsölbetrieb eines für Dieselkraftstoff ausgelegten Motors bedeutet dies, dass mindestens eine Anpassung des Einspritzsystems erforderlich ist, um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten. Nur so kann sichergestellt werden, dass der Motor störungsfrei, sparsam und unter Einhaltung der Abgasemissionsvorschriften betrieben werden kann.

Besonders angepasste Motoren mit Direkteinspritzung laufen vor allem dann erfolgreich und zuverlässig, wenn der Brennraum ausreichend heiß ist [8]. Die Siedelinie des Pflanzenöls macht dies erforderlich, damit eine vollständige Entzündung erfolgen kann. Bei Teillast und Leerlauf ergeben sich deshalb die meisten Probleme.

Praxiserfahrungen über den Betrieb von Common-Rail Motoren mit Rapsöl liegen kaum vor [2]. Wissenschaftlich fundierte Forschungsvorhaben untersuchen lediglich die Auswirkungen von Rapsöl in solchen Motorentypen auf Abgas und Betriebsverhalten. In [5] wurde der Einfluss der Kraftstoffeigenschaftenunterschiede bei der Verwendung von Rapsöl (und Rapsmethylester) in einem im Serienzustand belassenen Common-Rail Dieselmotor untersucht. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen wurde dabei auf die Kraftstoffeinspritzung und -zerstäubung sowie die thermodynamische Analyse und die Abgasemissionen gerichtet. Es wurden jedoch keine Vorschläge zur Optimierung von Einspritzsystem oder Einspritzparametern, wie sie für die Verwendung von Pflanzenöl notwendig sind, erarbeitet.

Eine bedeutende Herausforderung für alle mit Rapsöl betriebenen Dieselmotoren, ist die plötzliche Eindickung des Motoröls (Polymerisation) mit dem damit verbundenen Ausfall der Motorschmierung, was zu elementaren Motorschäden führt. Die Verdickung des Motoröls scheint vor allem durch Eintrag von größeren Mengen an Rapsöl hervorgerufen zu werden [11]. Der genaue Vorgang konnte bisher nicht geklärt werden, ein Zusammenhang mit den Additiven des Öls wird vermutet. Als Ursachen für den Eintrag von Rapsöl in das Motorenöl kommen wiederum die mangelhafte Gemischbildung und die unvollständige Verbrennung in Betracht. Unvollständig verbranntes Rapsöl kondensiert auf der Zylinderwand und wird mit dem Motorenöl in das Kurbelgehäuse gewaschen. Durch die erhöhte Viskosität und Oberflächenspannung können die Einspritzstrahlen verlängert werden, sodass diese schon während des Einspritzvorganges auf die Zylinderwand auftreffen. Eine Verdampfung von der Zylinderwand aus ist wegen der dortigen Temperaturen nicht möglich. Aus diesen auf die Wand aufgetragenen Kraftstoff wird ein nennenswerter Anteil in das Motorenöl transportiert. Neben der Menge des eingetragenen Pflanzenöls scheint auch die Qualität desselben und die Art des Motoröls einen Einfluss auf die Motorölverdickung und die anschließende -eindickung zu haben. Dieselmotoren nach dem Kammerverfahren sind von diesem Problem so gut wie gar nicht betroffen.

Im Praxisbetrieb wird diese Schwierigkeit durch verkürzte Ölwechselintervalle umschifft, die aber wirtschaftlich nicht sinnvoll sind.

Spezielle Motoren mit Direkteinspritzung für Pflanzenöl sind entwickelt worden und arbeiten zuverlässig sowie unter Erfüllung der geltenden Abgasgrenzwerte. Sie scheiden für viele Anwendungen leider aus, weil sie sehr teuer in der Herstellung sind (Einzelfertigung) und nur in wenigen Bau- bzw. Leistungsgrößen angeboten werden, zeigen aber, dass ein betriebssicheres Brennverfahren mit Pflanzenölkraftstoffen möglich ist. Bisher nicht voll ausgereift sind die Konzepte zur Nutzung von Rapsöl in serienmäßig hergestellten Dieselmotoren.

Eine Motorabstimmung ist allerdings nur für eine Sorte Pflanzenöl, z. B. Rapsöl, optimal geeignet. Ein Wechsel auf ein anderes Öl erfordert neue Anpassungsmaßnahmen. Praktisch keine Veröffentlichung geht auf die Einspritzung und Gemischbildung des Pflanzenöls in einem serienmäßig hergestellten Motor und vor allem solche mit modernen Einspritzsystemen ein. Diese Brennverfahrensentwicklung, wie sie genauso bei der Entwicklung eines neuen Motors für die Einspritzung von Dieselmotoren durchgeführt werden muss, ist Hauptdefizit und Hindernis bei der intensiven Nutzung von Pflanzenöl. Sie wird deshalb von verschiedenen Quellen dringend gefordert.

Die Optimierung eines Diesel-Brennverfahrens für Rapsöl kann nur dann erfolgreich gelingen, wenn die gesamte Gemischbildung, die sich aus Einspritzung und Luftbewegung zusammensetzt, auf eine vollständige Verbrennung mit diesem Kraftstoff abgestimmt ist. Grundlage hierfür sind deshalb die Kenntnis und die Verbesserung der Strahlausbreitung, mit der die unzureichende Gemischbildung sowie die unvollständige Verbrennung geklärt beziehungsweise beseitigt werden können.

## 5 STRUKTUR DES GESAMTEN FORSCHUNGSVORHABENS

Das gesamte Forschungsvorhaben der Brennverfahrensentwicklung für einen Dieselmotor, der mit reinem Rapsöl betrieben werden soll, gliedert sich in drei Arbeitsblöcke.

Ausgehend von einem Vergleich der Einspritzstrahlen von Rapsöl und Dieselkraftstoff werden in einer optisch zugänglichen Einspritzkammer die optimalen Bedingungen für ein zufrieden stellendes Einspritzverhalten des Pflanzenöls in den Brennraum ermittelt.

Die erarbeiteten Vorschläge sind im nächsten Schritt des Gesamtvorhabens an einem Einzylinder-Forschungsmotor zu überprüfen, zu bewerten und gegebenenfalls hinsichtlich einer guten Gemischbildung zu optimieren.

Anschließend soll mithilfe der Forschungsergebnisse der störungsfreie Praxisbetrieb eines Versuchsträgers mit Rapsöl ermöglicht werden.

### 5.1 Erster Arbeitsblock: Optische Untersuchung der Einspritzstrahlen

Der vorliegende Bericht beschreibt die Arbeiten des ersten Arbeitsblocks des Forschungsprojekts.

Die Strahlausbreitung wird nicht in einem Motor sondern in der Einspritzkammer analysiert. Durch die großzügig dimensionierten optischen Zugänge ist eine gute Beobachtung der Einspritzstrahlen möglich ohne die optische Messtechnik einer Gefahr der Verschmutzung mit Kraftstoff auszusetzen.

Für die Untersuchungen stehen zwei Einspritzkammern zur Verfügung.

- Atmosphärenkammer für quantitative Grundaussagen
- Druckkammer zum Simulieren dieselmotorischer Umgebungsbedingung

Das Messprogramm beinhaltet in erster Linie die Variation der Temperatur des Kraftstoffs, denn die Literatur gibt Hinweise darauf, dass sich die Stoffeigenschaften von Pflanzenöl (Viskosität, Siedeverlauf) bei steigender Temperatur zunehmend an die von Dieselkraftstoff angleichen. Hier gilt es eine Temperatur zu finden, bei der ein zufrieden stellendes Einspritzverhalten von Rapsöl gefunden wird, ohne dass sich wegen der hohen Temperatur Polymerisat oder Dampfblasen bilden. Vergleichsbasis ist der mit Dieselkraftstoff erzeugte Einspritzstrahl. Die Geometrie der Einspritzdüsen wird erst im nachfolgenden Forschungsvorhaben verändert.

Die Ergebnisse an der Einspritzkammer liefern Aussagen

- zum Verhalten des Strahlbildes
- unter welchen Umständen die Brennraumwand benetzt wird
- welche Kraftstofftemperatur erforderlich ist
- zur Optimierung der Düsengeometrie



## 5.2 Zweiter Arbeitsblock: Untersuchung der Gemischbildung im Einzylinder-Forschungsmotor

Im nachfolgenden Forschungsprojekt, dem zweiten Block, sollen die Ergebnisse der optischen Untersuchungen an einem Forschungs-Einzylindermotor validiert werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten wird

- eine Bewertung der Gemischbildung
- die Überprüfung der vorgeschlagenen Düsengeometrien
- eine Analyse des Emissionsverhaltens
- eine Aussagen über Ablagerungen im Brennraum
- die Beurteilung des Eintrags von Rapsöl in das Motoröl

liefern.

Die Untersuchungen werden an einem Einzylinder Forschungsmotor [12] [13] (Abbildung 10) durchgeführt. Dieses Forschungsaggregat ermöglicht die Abbildung verschiedener Kompressionsverhältnisse und Brennräume im Hubraumbereich von etwa 2 l/Zylinder. Des weiteren können an diesem Forschungsmotor wahlweise verschiedene Einspritzsysteme (Common-Rail System,nockengesteuertes System) adaptiert werden. Zusätzlich ist eine externe Aufladung mittels mechanischem Kompressor sowie externe Abgasrückführung möglich, mit dem sich auch der in der Praxis meist vorhandene Abgasturbolader simulieren lässt.

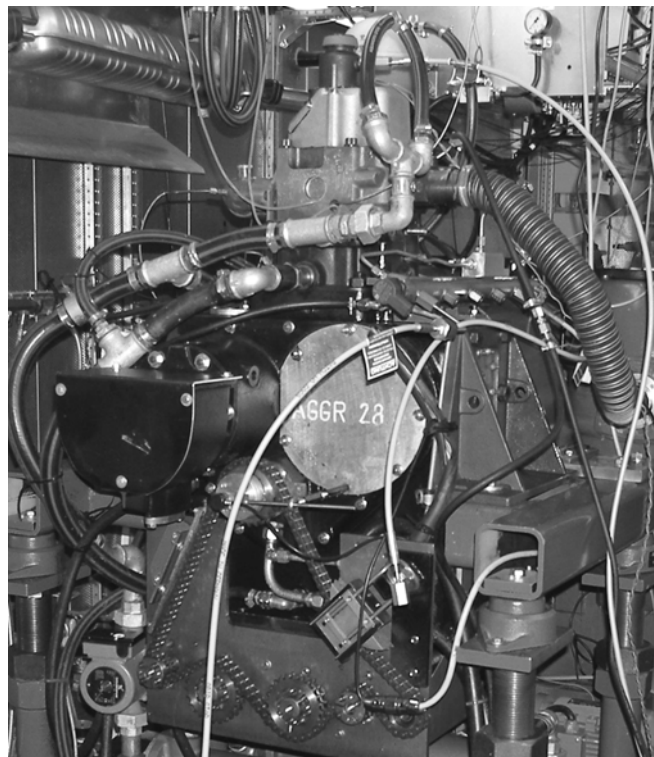


Abbildung 10: Einzylinder-Forschungsaggregat

### 5.3 Dritter Arbeitsblock: Übertragung auf den Vollmotor im Praxisbetrieb

Nach erfolgreicher Abarbeitung der ersten beiden Arbeitsblöcke erfolgt im dritten Block der Übertrag der Forschungsergebnisse in einen Vollmotor im Praxisbetrieb. In dieser Arbeitsphase wird vor allem die Praxistauglichkeit des Gesamtsystems „Dieselmotor mit Rapsöl angetrieben“ im Mittelpunkt stehen. Neben der Adaption des optimierten Einspritzsystems sind hier auch die Anbindung und der mögliche Umbau der Peripherie des Verbrennungsmotors zu beachten. Dieser Schritt wird Lösungen zu Fragen des Gesamtsystems vom Tanken bei Minustemperaturen bis zur Handhabung durch das Personal angehen und vor allem Erkenntnisse über längere Fahrstrecken ergeben.

Für die Praxiserprobung stellt die Hohenzollerische Landesbahn AG (HzL) einen Eisenbahntriebwagen vom Typ RegioShuttle 1 (RS1) zur Verfügung (Abbildung 11 links). Dessen MAN D2866 Motor ist mit einemnockengesteuerten Einspritzsystem ausgerüstet.



Abbildung 11: Versuchsträger für den Praxisbetrieb, RS1 und Fährschiff

In einem Binnenseefährenschiff soll ein Motor mit Common-Rail Einspritzsystem als zweiter Demonstrator betrieben werden, um auch die Anforderungen an diesen Lastfall und mit dieser Technik darzustellen.

## 6 PRÜFSTAND UND MESSTECHNIK

Für die Untersuchung des Einspritzverhaltens von reinem Rapsöl im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff ist ein Einspritzprüfstand mit entsprechender Peripherie notwendig. Dieser setzt sich aus einer Kraftstoffversorgungseinheit, der Einspritzkammer und der erforderlichen Mess- und Regelungstechnik zusammen.

### 6.1 Kraftstoffversorgungseinheit

An die zu entwickelnde Kraftstoffversorgungseinheit werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Anlage muss variabel für den Einbau verschiedener Einspritzsysteme (Common-Rail oder nockengesteuertes System) gestaltet werden.
- Spülvorgänge und die Mischung von Kraftstoffen müssen möglich sein.
- Zur Erwärmung des Kraftstoffes sollen verschiedene Heizkonzepte verfügbar sein.
- Der Aufbau der Anlage soll aus Gründen des starken Praxisbezugs des Forschungsprojektes eng an den Aufbau der realen Anlage im Eisenbahnfahrzeug angelehnt sein.
- Die Einheit muss mobil sein, um den Einsatz an verschiedenen Prüfständen zu ermöglichen.

Abbildung 12 zeigt den schematischen Aufbau des Kraftstoffsystems. Die Einspritzpumpe stellt den zentralen Bestandteil des Systems dar. Neu entwickelte Motoren werden heute mit modernen Einspritzsystemen wie Common-Rail Systemen ausgerüstet. Allerdings werden auch in absehbarer Zukunft weiterhin viele Dieselmotoren mit nockengesteuertem Einspritzsystem im Einsatz stehen (vgl. RegioShuttle). Aus diesem Grund ist es unbedingt erforderlich, diesen Motorentyp ebenfalls in die Untersuchungen des Einspritzverhaltens mit einzubeziehen.

Durch geschickte Konstruktion der Kraftstoffversorgungseinheit ist es möglich, sowohl eine Common-Rail Pumpe als auch eine Reiheneinspritzpumpe daran zu betreiben. Zusammen mit dem dazugehörigen Wechsel von Injektor bzw. Einspritzdüse kann das Kraftstoffsystem in kurzer Zeit von einem Einspritzsystem auf das andere umgebaut werden.

Für die Untersuchungen des Common-Rail Systems wird eine Bosch CP3 Hochdruckpumpe verwendet. Der maximal mögliche Einspritzdruck liegt bei 1.600 bar. Bei dem für die Untersuchungen ausgewählten Injektor handelt es sich um einen Common-Rail Speichereinspritzsystem Injektor Bosch BR2000CR (Abbildung 13).

Eine Bosch Reiheneinspritzpumpe vom Typ PES 6H120 wird für die Untersuchungen des nockengesteuerten Systems in der Kraftstoffversorgungseinheit eingebaut. Der Einspritzspitzendruck kann bei dieser Pumpe kurzzeitig bis auf 2.200 bar ansteigen. Der gleiche Pumpentyp findet an dem 6-Zylinder MAN D2866 Dieselmotor des Eisenbahntriebwagens Verwendung. Für die optischen

Untersuchungen wird nur der von einem Pumpenelement geförderte Kraftstoff benötigt. Die übrigen fünf Pumpenelemente fördern den Kraftstoff in eine gemeinsame Sammel-Rückführleitung.

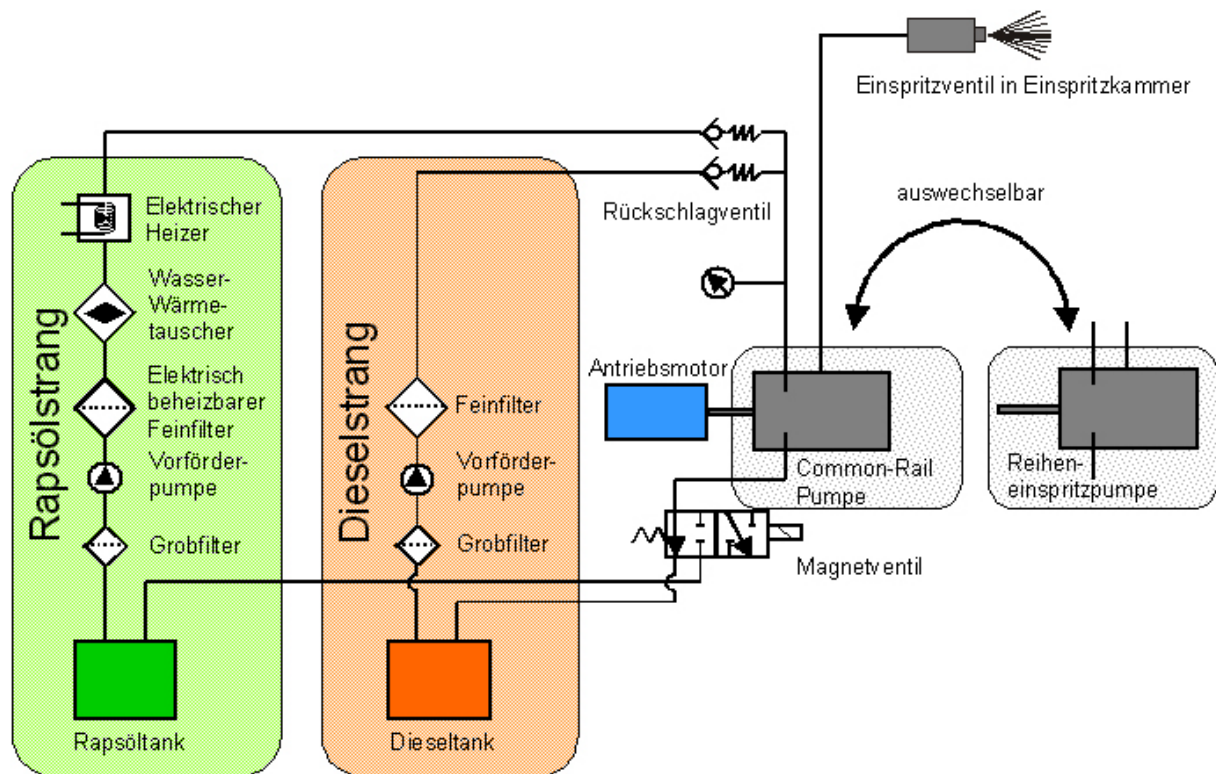


Abbildung 12: Schema der Kraftstoffversorgungseinheit

Als Einspritzdüse wird wie im MAN D2866 eine Bosch DLLA 152P 1231 Düse verwendet (Abbildung 13).

Im Praxiseinsatz am Dieselmotor werden die Einspritzpumpen über eine Zahnradübersetzung von der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors angetrieben. In der Kraftstoffversorgungseinheit übernimmt ein 3,5 kW starker Gleichstrommotor diese Aufgabe. Der Motor ist über eine starre Welle mit der Hochdruckpumpe verbunden. Bei Verwendung der Reiheneinspritzpumpe stellt sich das Problem,



Abbildung 13: Bosch Injektor BR2000CR (hinten) Bosch Einspritzdüse DLLA 152P 1231 (vorne)

dass der Elektromotor die Nockenwelle über den Widerstand der Pumpenelemente mit möglichst gleichmäßiger Drehzahl drehen muss. Da das Trägheitsmoment des Elektromotors bedeutend kleiner

ist als das des im realen Betrieb eingesetzten Verbrennungsmotors, wird auf der Antriebswelle ein großzügig dimensioniertes Schwungrad adaptiert. Um ein möglichst hohes Trägheitsmassenmoment zu erhalten, konzentriert sich dessen Gewicht von etwa 40 kg auf einem 2 cm starken Hohlzylinder aus Stahl, der einen Durchmesser von 45 cm aufweist. Das Trägheitsmoment dieser Schwunghasse gewährleistet eine ausreichend stabile Drehzahl der Nockenwelle bei Betrieb der Reiheneinspritzpumpe. Zur Erfassung der Drehzahl und zur Detektion der Stellung der Nockenwelle ist an den Elektromotor ein Winkelmarkengeber (Firma Heidenhain) angebracht.

Wie in Abbildung 12 ersichtlich, existieren für den Kraftstoffkreislauf zwei einzelne Stränge. Einer für Rapsöl, der Zweite für Dieselkraftstoff. Dieser Aufbau der Versorgungseinheit orientiert sich an dem Konzept des „2-Tank-Systems“ (Abbildung 14) wie es von verschiedenen Umrüstunternehmen angeboten wird. Bei diesem System sind zwei Tanks für die beiden Kraftstoffe vorhanden. Üblicherweise wird der Verbrennungsmotor mit Dieselkraftstoff gestartet und dann zunächst das Rapsöl durch elektrische Heizer oder das sich erwärmende Motorkühlwasser aufgeheizt. Beim Erreichen einer bestimmten Rapsöltemperatur schaltet das 2-Tank-System (ggf. automatisch) auf den biogenen Treibstoff um.

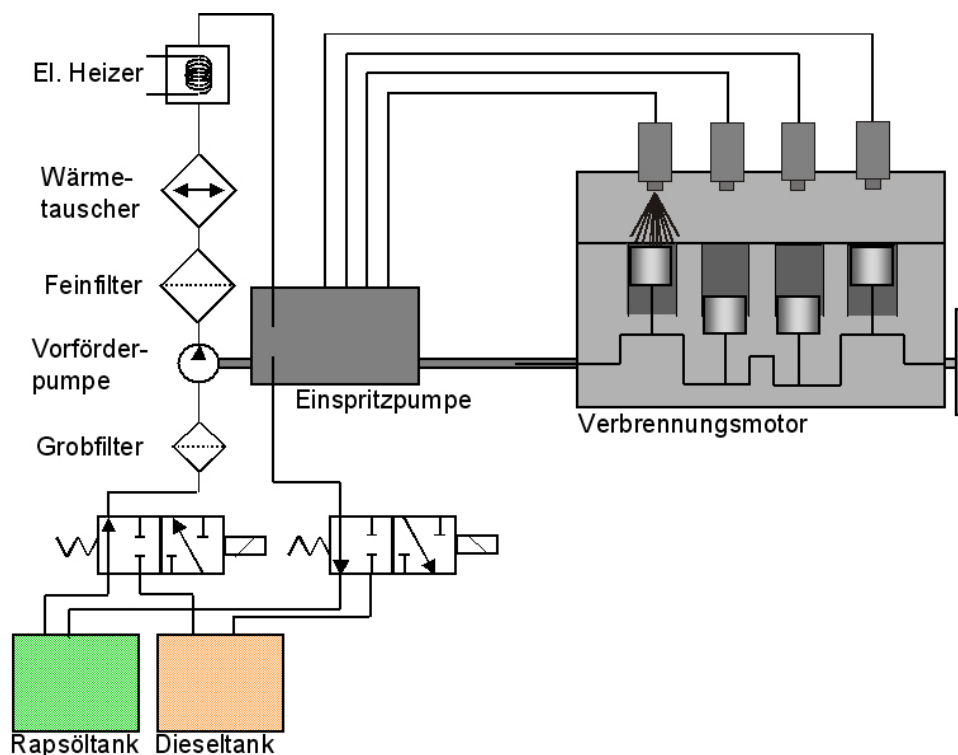


Abbildung 14: 2-Tank-System

Bei der entwickelten Kraftstoffversorgungseinheit vereinigen sich die beiden Kraftstoffstränge vor der Hochdruckpumpe. Dabei wird jeder einzelne Strang durch ein Rückschlagventil entgegen der Durchflussrichtung gesperrt. Im Gegensatz zu einem 2/3-Regelventil sind so auch Mischungen der beiden Kraftstoffe möglich. Das Mischungsverhältnis ist abhängig von der Förderleistung der beiden Vorförderpumpen (Zahnradpumpen), die mittels Steuerung der Drehzahl variiert werden kann.

Die Vorförderpumpe im Rapsölstrang (Typ KF 4 RF 2-D15, Firma Kracht, Werdohl) ist eigens für Pflanzenöl-Kraftstoffe ausgelegt und wurde bereits bei verschiedenen Praxiseinsätzen erprobt.

Um die Pumpen vor Verstopfen durch grobe Schmutzpartikel aus den beiden Tankkanistern für Rapsöl und Dieselkraftstoff zu schützen, sind in den beiden Strängen vor den Pumpen Grobfilter verbaut.

Nach der Vorförderpumpe ist im Dieselstrang ein handelsüblicher Dieselfilter verbaut. Bei dem entsprechenden Feinfilter im Rapsölstrang handelt es sich um einen für Pflanzenölkraftstoffe ausgelegten, beheizbaren Knecht-Filter, Typ KC66/1 RME Fuel Filter. Der Filter besitzt die doppelte Filterfläche eines normalen Dieselfilters, die integrierte Heizvorrichtung stellt eine Möglichkeit dar, Rapsöl vorzuheizen. Die Heizleistung ist regelbar bis maximal 1,4 kW.

Eine weitere Heizmöglichkeit bietet der Platten-Wärmetauscher der Firma Alfa Laval im Rapsölstrang. Mittels der Durchflusswerte wurde der entsprechende Typ durch ein Simulationsprogramm ausgewählt. Die Heizleistung beträgt bis zu 3,5 kW bei einem maximalen Durchfluss von 12 m<sup>3</sup>/h. Im realen Einsatz wird das warme Kühlwasser des Verbrennungsmotors durch den Wärmetauscher geleitet und erwärmt so das Rapsöl. Im Prüfstandsbetrieb übernimmt diese Aufgabe ein in der Heizleistung regelbarer Umwälzthermostat der Firma Julabo, Seelbach, der mit Wasser gefüllt ist.

Die dritte Option, um das Rapsöl zu erwärmen, bildet ein elektrisches Heizmodul im Rapsölstrang. Das Rapsöl fließt darin spiralförmig durch einen besonderen Aluminiumkörper, der mit vier Glühstiften (1,5 kW) bestückt ist. Das Modul ist so aufgebaut, dass das Rapsöl nicht direkt mit den heißen Glühstiften in Berührung tritt, so wird die Gefahr der Polymerisation des Rapsöls vermieden.

Im Dieselstrang ist keine Heizvorrichtung vorgesehen, für einzelne Experimente mit erwärmtem Dieselkraftstoff wurde dieser über den Rapsölstrang geführt.

Über die bereits erwähnten Rückschlagventile gelangt der Kraftstoff aus den einzelnen Strängen in eine gemeinsame Leitung mit Drucksensor in die Hochdruckpumpe. An die Rücklaufleitung aus der Hochdruckpumpe ist ein Magnetventil angeschlossen. Dadurch lässt sich der Rückfluss des Kraftstoffs in den entsprechenden Tank - ohne Vermischung der Kraftstoffe - sicherstellen. Für den Fall der Untersuchungen von Kraftstoffgemischen oder bei Spülvorgängen wird ein zusätzlicher Tank angeschlossen.

Die Konstruktion der Anlage wurde mithilfe des CAD-Programms Pro/ENGINEER durchgeführt (Abbildung 15).

Sämtliche Komponenten befinden sich in einem fahrbaren Gestell mit den Abmessungen 160 cm Länge, 50 cm Breite und 70 cm Höhe. Dadurch ist der Einsatz der Einheit auch in Motorenprüfständen gewährleistet.

Die Elektronik für die Steuerung der Anlage wird ebenfalls in der Kraftstoffversorgungseinheit untergebracht (links unten in Abbildung 15).

Die Hochdruckleitung zur Einspritzdüse bzw. zum Injektor wird am optischen Prüfstand mittels eines Heizbandes beheizt und damit auf der Temperatur gehalten, auf die der Kraftstoff mit den verschiedenen Vorwärmssystemen gebracht wurde. Im Gegensatz zum praktischen Betrieb werden bei den optischen Untersuchungen immer nur wenige aufeinander folgende Zyklen eingespritzt und

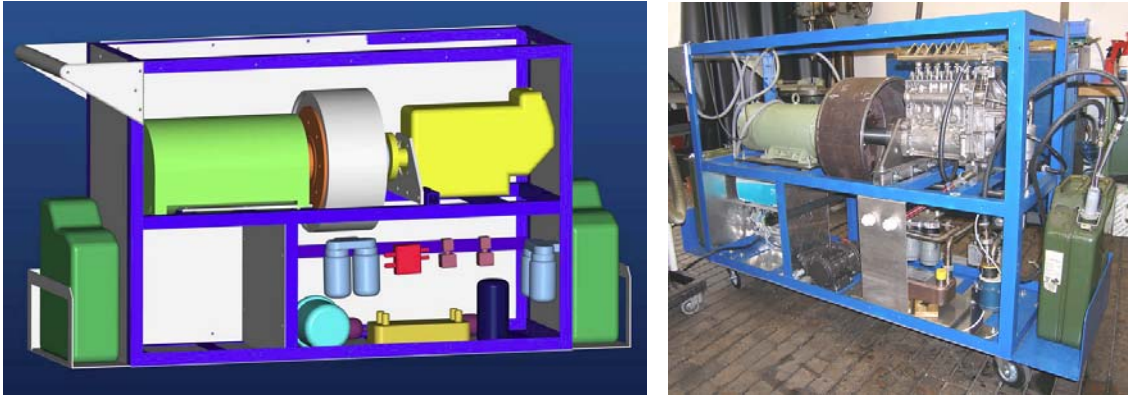


Abbildung 15: CAD-Planung und Realisierung der Kraftstoffversorgungseinheit

optisch aufgenommen, um die Verschmutzung der Fenster auf ein Minimum zu begrenzen. Während der Wartezeit bis zur nächsten Aufnahmeeinstellung könnte der Kraftstoff in der Leitung abkühlen.

## 6.2 Einspritzkammer / Druckkammer

Für die optischen Untersuchungen stehen zwei Einspritzkammern zur Verfügung.

- Großvolumige Atmosphärenkammer
- Druckkammer

Mit der Atmosphärenkammer (Abbildung 16) können die Einspritzstrahlen bei Umgebungsdruck und -temperatur untersucht werden. In der Kammer kann kein Innen- oder Gegendruck aufgebaut werden, dafür bietet diese Art der Einspritzkammer verschiedene andere Vorteile:

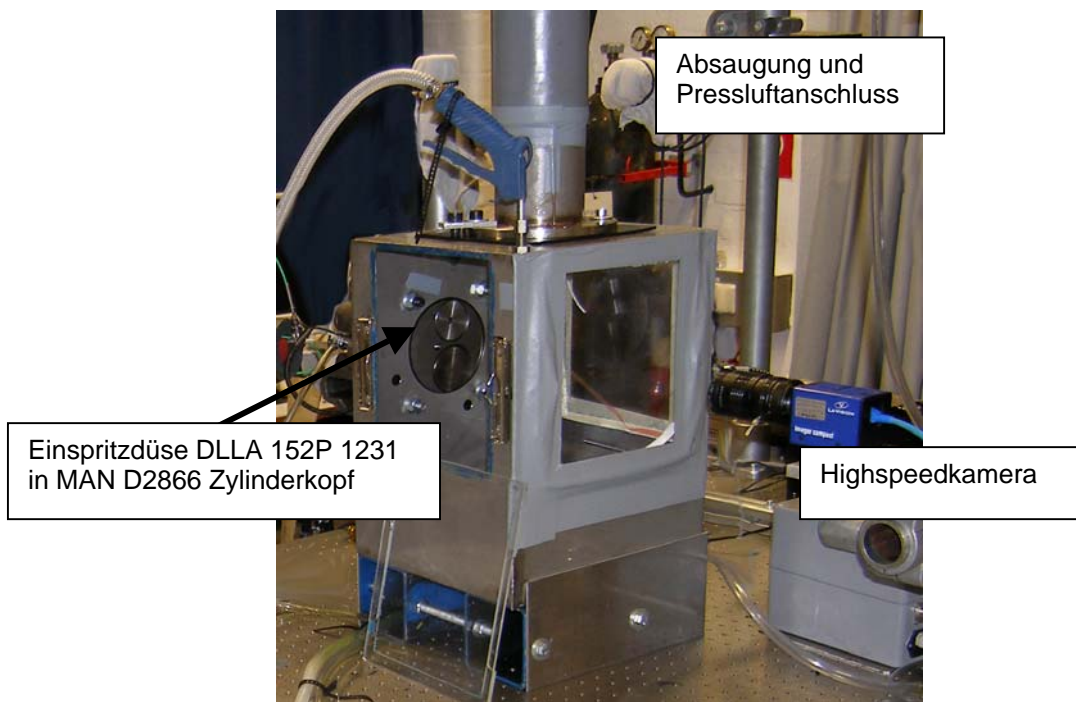


Abbildung 16: Atmosphärenkammer mit montierter Einspritzdüse und Kamera

Durch den Verzicht auf einen Druckaufbau in der Atmosphärenkammer ergibt sich eine einfachere Handhabung des gesamten Messaufbaus, es besteht keine Gefahr der Selbstzündung des Kraftstoffs beim

Einspritzen in die Kammer. Die Beobachtungsfenster der Kammer lassen sich einfacher von Kraftstoff reinigen und ein schneller Wechsel der Düse sowie deren Einbauposition ist möglich. Aufgrund des großen Volumens und der weiten Beobachtungsfenster lassen sich auch lange Einspritzstrahlen optimal beobachten.

In der Druckkammer ist dagegen die genaue Darstellung dieselmotorischer Zustände zum Zeitpunkt der Einspritzung möglich. Die Kammer wird mit Stickstoff gefüllt und auf eine Innentemperatur von 200 °C sowie einen

Druck von 50 bar gebracht. Die Stickstofffüllung verhindert eine Zündung und die Verbrennung des Kraftstoffs bei der Einspritzung. Durch druckfeste Fenster aus Quarzglas kann der Einspritzvorgang beobachtet werden.

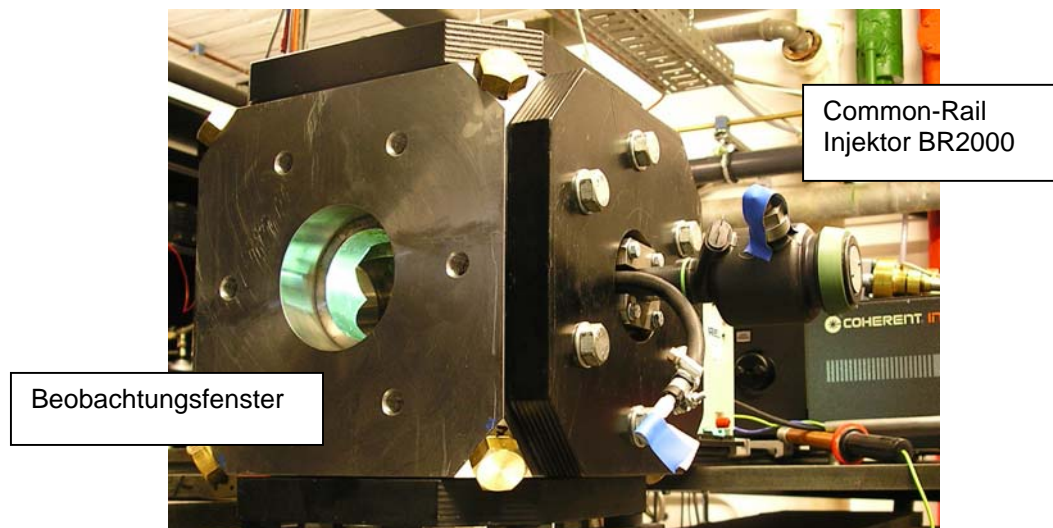


Abbildung 17: Druckkammer mit Common-Rail Injektor, Beobachtungsscheibe ausgebaut

### 6.3 Optische Messverfahren und Messtechnik

Die Ausbreitung der Einspritzstrahlen wird mittels optischer Aufnahmen untersucht. Die Aufnahme des an den Kraftstoffpartikeln gestreuten Lichts kann analog oder digital erfolgen. Aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Einspritzstrahls und der damit geforderten kurzen Verschlusszeit der benutzten Kamera, haben sich für diese Anwendung heute digitale CCD-Kameras durchgesetzt. Der lichtempfindliche Teil der Kamera ist der Charge-Coupled-Device (CCD) Chip, der ein zweidimensionales Array aus Halbleiterlichtsensoren, den sogenannten Pixels, enthält. Jeder einzelne Pixel wandelt die auftreffende Lichtenergie in eine dazu proportionale Ladung um.

Nach der erfolgten Aufnahme werden die Pixel ausgelesen und zur Weiterverarbeitung in Spannung konvertiert. Den Spannungen werden entsprechend der Intensität Graustufen zugewiesen, sodass die Bildinformationen vollständig digitalisiert vorliegen.



Bei den im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten Kameratypen handelt es sich um

- CCD-Kamera Imager Compact QE der Fa. LaVision, Auflösung: 1390 x 1024 Pixel
- High Sense PIV/LIV Kamera Fa. DANTEC, Auflösung: 1240X1024 Pixel

### Mie-Streulichtverfahren

Das Mie-Streulichtverfahren basiert auf der von dem deutschen Physiker Gustav Mie (1868 – 1957) aufgestellten Mie-Theorie, der Lichtstreuung an kugelförmigen Teilchen. Die Mie-Streuung tritt auf, wenn die Größe der Teilchen vergleichbar ist mit der Wellenlänge des einfallenden Lichts. Es handelt sich um eine elastische Streuung, das Licht erfährt nur eine Richtungs- aber keine Frequenzänderung. Da es sich bei der Mie-Streulichtmessung um einen Oberflächeneffekt handelt, kann mit diesem Verfahren prinzipbedingt nur die flüssige Phase eines Einspritzstrahls visualisiert werden.

Mittels der Mie-Streulichtmessung lassen sich qualitative Aussagen zum Auffächerungsverhalten des Einspritzstrahls und der Güte der Zerstäubung treffen. Das Spraybild kann im Hinblick auf eine gute zu erwartende Gemischbildung beurteilt werden. Für die Untersuchungen dieses Forschungsberichts wird die Güte des Strahlbildes der Einspritzstrahlen von Rapsöl mit der von Dieselmotorkraftstoff unter den gleichen Umgebungsbedingungen verglichen und bewertet [14].

Um trotz der geringen Intensität des in Beobachtungsrichtung gestreuten Lichts scharfe Aufnahmen zu erlangen, ist eine Lichtquelle mit hoher Intensität erforderlich. Da nur wenige Kameras mit schnell steuerbarem Verschluss ausgerüstet sind, muss die Belichtungszeit mithilfe der Lichtquelle geregelt werden. Aus diesem Grund kommen für diese Anforderung nur gepulste Laser oder kurz gepulste stroboskopische Blitzlampen in Frage. Für die vorliegenden Untersuchungen wird ein Bildverarbeitungsstroboskop Typ BVS-020 der Fa. Polytec verwendet.

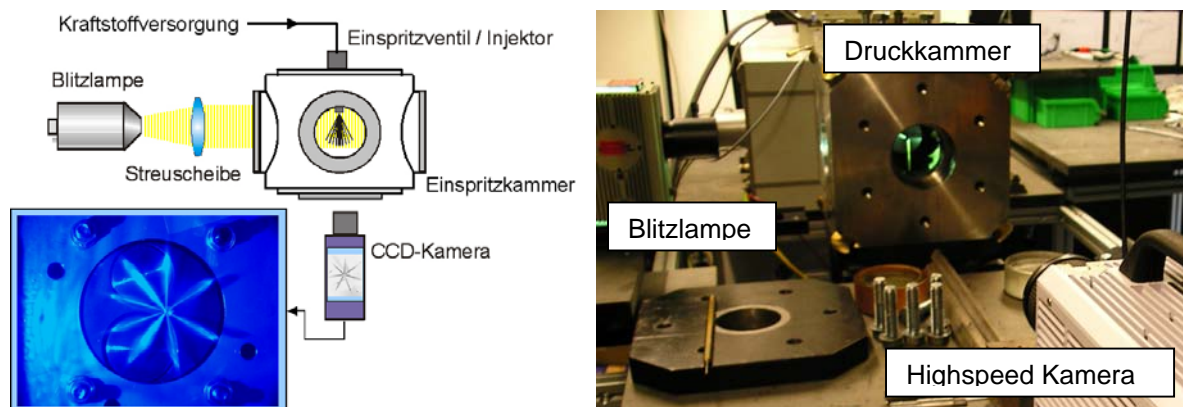


Abbildung 18: Versuchsaufbau Mie-Streulichtverfahren (links: Schema, rechts: Durchführung)

Abbildung 18 verdeutlicht den Versuchsaufbau bei Verwendung des Mie-Streulichtverfahrens. Die Einspritzdüse bzw. der Injektor spritzt in die Einspritzkammer ein. Die CCD-Kamera befindet sich außerhalb der Kammer, hinter einem Beobachtungsfenster genau auf der gegenüberliegenden Seite der Injektorposition. Im rechten Winkel zu dieser imaginären Achse Injektor – Kamera wird die

Blitzlampe so positioniert, dass das von ihr ausgehende Licht durch ein weiteres Beobachtungsfenster auf die Einspritzstrahlen fällt.

### Schattenrissaufnahme

Die Schattenrisstechnik (Gegenlichtfotografie) liefert eine Draufsicht auf die räumliche Ausbreitung des Kraftstoffstrahls im Raum. Als Lichtquelle dient in der Regel eine Blitzlampe mit kurzer Leuchtdauer, die gegenüber der Kamera hinter einer Streuscheibe angeordnet wird. Zwischen Streuscheibe und Kamera tritt der Kraftstoffstrahl ein, dessen Tröpfchen eine Beugung der Lichtstrahlen verursachen (Durchlichtverfahren). Der Einspritzstrahl erscheint daher als dunkler Schatten auf dem Bild. Die gewonnenen Aufnahmen sind ideal, um Eindringtiefe und Fächerwinkel des Strahls bei verschiedenen Randbedingungen wie Kraftstofftemperatur oder Einspritzdruck zu beurteilen. Allerdings lassen sie keinen Schluss auf den inneren Aufbau eines Einspritzstrahls zu.

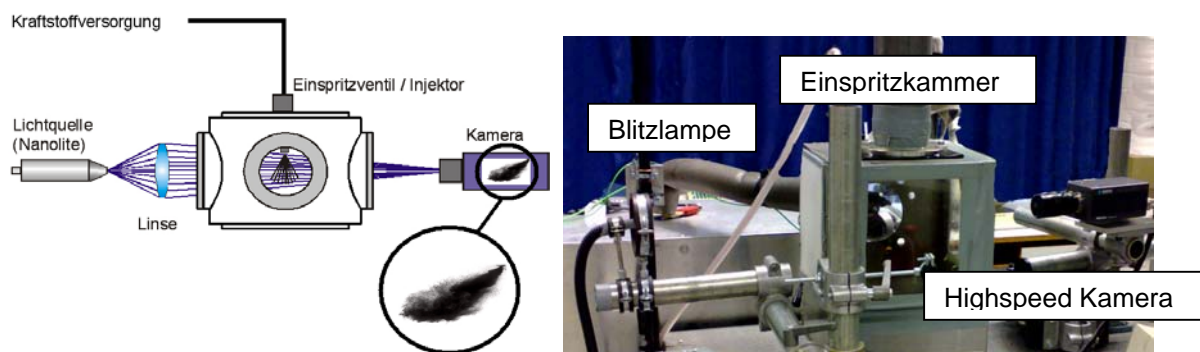


Abbildung 19: Schattenrisstechnik, Schema (links) Versuch (rechts)

In Bezug auf die Verdampfung eines Einspritzstrahls können Ergebnisse aus der Druckkammer nur sehr eingeschränkt auf einen realen Motor übertragen werden. Aus diesem Grund beschränken sich die Versuche lediglich auf optische Messungen und Untersuchungen des Strahlverhaltens. Die Verdampfung ist sehr stark von der momentanen Temperatur während der Einspritzung abhängig. Diese unterliegt im realen Motor großen Schwankungen und wäre wegen der fehlenden Verbrennung in einer Druckkammer nur mit großem Aufwand nachzubilden. Ähnliche Aussagen lassen sich mit wesentlich geringerem Aufwand im nachfolgenden zweiten Arbeitsblock direkt im realen Motor erzielen, an dem die Untersuchungen ohnehin fortgesetzt werden müssen.

## 6.4 Druckmessung

Zusätzlich zu der optischen Analyse der Einspritzstrahlen ist auch die Erfassung des Einspritzdrucks bei verschiedenen Kraftstoffen und Variationsparametern wichtig. Bei Einspritzsystemen, die nicht druckgeregelt sind, kann die höhere Kompressibilität [16] des Rapsöls vor allem bei niedrigen Temperaturen zu einem Druckanstieg im System führen. Zur Überprüfung und Bewertung dieses Verhaltens wurde in der Hochdruckleitung vor dem Einspritzventil ein Kistler Druckquarz, Typ 4067 A2000, adaptiert. Unter Einsatz des Indiziersystem COMBI der Firma SMEtec, Geilenkirchen, lässt

sich so der Druckverlauf über den Drehwinkelverlauf der Nockenwelle der Reiheneinspritzpumpe aufzeichnen und analysieren.

Weitere Drucksensoren sind zur Überwachung der Kraftstoffversorgungseinheit in den beiden Kraftstoffsträngen und vor der Hochdruckpumpe installiert.

## 6.5 Temperaturmessung

Zur Regelung der gewünschten Kraftstofftemperatur ist die Kenntnis über die momentane Ist-Temperatur notwendig. Temperatursensoren sind deshalb vor und nach der Hochdruckpumpe und vor dem Injektor angebracht. Im Rapsölstrang befinden sich zusätzliche Sensoren vor und nach den einzelnen Heizeinrichtungen (vgl. Kap. 6.1). In Verbindung mit einer Steuer- und Regelungstechnik wird die gewünschte Soll-Temperatur automatisch eingestellt.

## 6.6 Datenverarbeitung

Die Speicherung und Aufarbeitung der erfassten Daten wird von mehreren PC-Systemen mit entsprechenden Programmen übernommen.

- Aufzeichnung der Prüfstandsdaten wie Drehzahl, Temperaturen und Niederdrücke
- Indiziersystem für die Analyse des Druckverlaufs in der Hochdruckleitung
- Kamera-PC-System für die Ansteuerung der Kamera und Speicherung der Bilder

## 7 MESSPROGRAMM

Die Literatur gibt Hinweise darauf, dass sich bei steigender Temperatur die physikalischen Eigenschaften des Rapsöls denen von Dieselkraftstoff annähern. Deshalb wird in einem ersten Schritt das Einspritzstrahlbild von Diesel aufgenommen, das als Vergleichs- und Bewertungsbasis des Einspritzverhaltens von Rapsöl dient. Die Aufnahmen werden bei verschiedenen simulierten Lastpunkten aufgezeichnet.

Im zweiten Schritt wird das Einspritzverhalten von Rapsöl untersucht. Die Untersuchungen beginnen mit der Variation der Temperatur des Rapsöls. Hier gilt es, eine Temperatur zu finden, bei der, ohne Veränderung der Einspritzanlage, der qualitativ beste Einspritzstrahl mit Pflanzenöl erzeugt wird, ohne dass sich wegen der hohen Temperatur Polymerisat oder Dampfblasen bilden. Die Temperaturobergrenze wird deshalb auf 70 °C festgelegt.

Im darauf folgenden Schritt konzentriert sich auf die Parameter auf die Einspritzanlage. Dies ist die Variation des Druckes (bei Common-Rail) bzw. die der Drehzahl (nockengesteuertes System).

Bei Experimenten, die an der Druckkammer vorgenommen werden, wird zusätzlich der Kammerdruck und die Temperatur variiert.

## 8 ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen zur einfacheren Orientierung mit Icons versehen, die den untersuchten Kraftstoff und das verwendete Einspritzsystem kennzeichnen. Dabei gilt:





	Diesel	Rapsöl
Nockengesteuertes System		
Common-Rail System		

Abbildung 20 zeigt die Kombinationen der durchgeführten Experimente.













	Nockenge- steuertes System	Common- Rail- System
Kraftstofftemperatur	 	 
Drehzahl	 	
Einspritzdruck		 
Kammerdruck	 	 

Abbildung 20: Matrix der durchgeführten Untersuchungen

### 8.1 Kraftstofftemperaturvariation

Die Temperatur beider Kraftstoffe wurde sowohl für das nockengesteuerte System als auch für das Common-Rail System variiert. Dabei wurde Rapsöl in den Stufen 20 °C über 50 °C auf 70 °C und Diesekraftstoff auf von 20 °C über 50 °C auf 60 °C erwärmt. Die Grenze der Kraftstofftemperatur für Rapsöl wurde auf 70 °C festgelegt, denn dieser Wert liegt unter der Grenztemperatur von etwa 75 °C ab der bei Rapsöl die Polymerisation des Kraftstoffs beginnt. Wegen des Flammpunktes von Diesel (55 °C) wurde dieser Kraftstoff nicht über 60 °C hinaus erwärmt.

## Nockengesteuertes Einspritzsystem

Bei Untersuchungen mit der Reiheneinspritzpumpe (nockengesteuertes Einspritzsystem) wurden die Füllmenge und der Spritzbeginn über die Versuche hinweg für alle Messpunkte konstant gehalten. Die Abweichungen des Beginns der Einspritzung und die der Dauer des Einspritzvorgangs sind so lediglich auf die physikalischen Eigenschaften des Kraftstoffs in Abhängigkeit von der jeweiligen Kraftstofftemperatur zurückzuführen.

Durch die Untersuchungen des nockengesteuerten Systems mit der Bosch Einspritzdüse DLLA 152P 1231 wird bereits mit dem Referenzkraftstoff Diesel ein ungleichmäßiges Spritzbild (Abbildung 21) entdeckt. Es stellt sich keine gleichmäßige Ausbreitung der Einspritzstrahlen ein, vielmehr sind einige Strahlen verkürzt (rechte Seite) oder verlängert (rechts oben). Die unterschiedliche Ausprägung der einzelnen Einspritzstrahlen ist darauf zurückzuführen, dass die Einspritzdüse konstruktionsbedingt geneigt in den Zylinderkopf des MAN D2866 eingebaut wird. Um dennoch ein Strahlbild zu erzielen, dessen Ebene parallel zum Zylinderkopf liegt, wurde auch die Ebene der Düsenlöcher zur Düsenlängsachse geneigt konstruiert. Dadurch ergeben sich für die einzelnen Spritzlöcher unterschiedliche geometrische Lagen des Einlaufs, die zusammen mit der Sacklochinnenströmung zu dem beobachteten ungleichmäßigen Strahlbild führen.

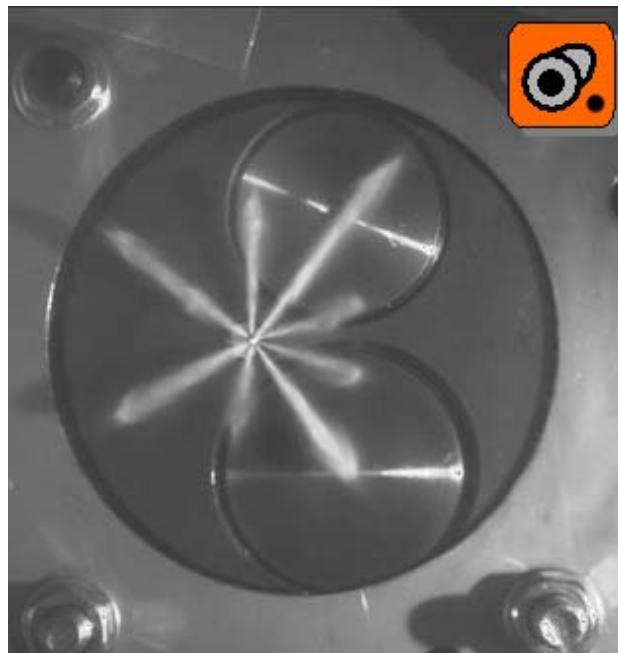


Abbildung 21: Bosch DLLA 152P 1231, ungleichmäßiges Einspritzbild

Trotz der nicht optimalen Lochgeometrie der Düse und dem sich daraus ergebenden suboptimalen Strahlbild, wird diese Einspritzdüse wegen des starken Praxisbezugs des Gesamtprojektes für die Untersuchungen verwendet.

In Abbildung 22 sind mittels der Streulichtmessung aufgenommene einzelne ausgewählte Aufnahmen des Einspritzvorganges von Diesel und Rapsöl dargestellt. Beide Kraftstoffe wurden auf 20 °C temperiert, die Drehzahl der Reiheneinspritzpumpe lag bei 250 1/min. Dies entspricht bei einem Heavy-Duty Diesel Viertaktmotor einer Leerlaufdrehzahl von 500 1/min.

Die Aufnahmen lassen einen Verzug des Einspritzbeginns bei Verwendung von Rapsöl erkennen. Zu gleichen Aufnahmezeitpunkten nach Einspritzbeginn von Dieseldieselkraftstoff sind die Einspritzstrahlen von Diesel weiter vorgedrungen. Weiterhin wird während des Einspritzvorgangs der Strahlmantel der Einzelstrahlen von Diesel besser aufgebaut. Zusätzlich ist eine stärkere Intensität der Helligkeit der Dieseleinspritzstrahlen zu erkennen, was auf eine feinere Zerstäubung und größere Tröpfchenanzahl hinweist.

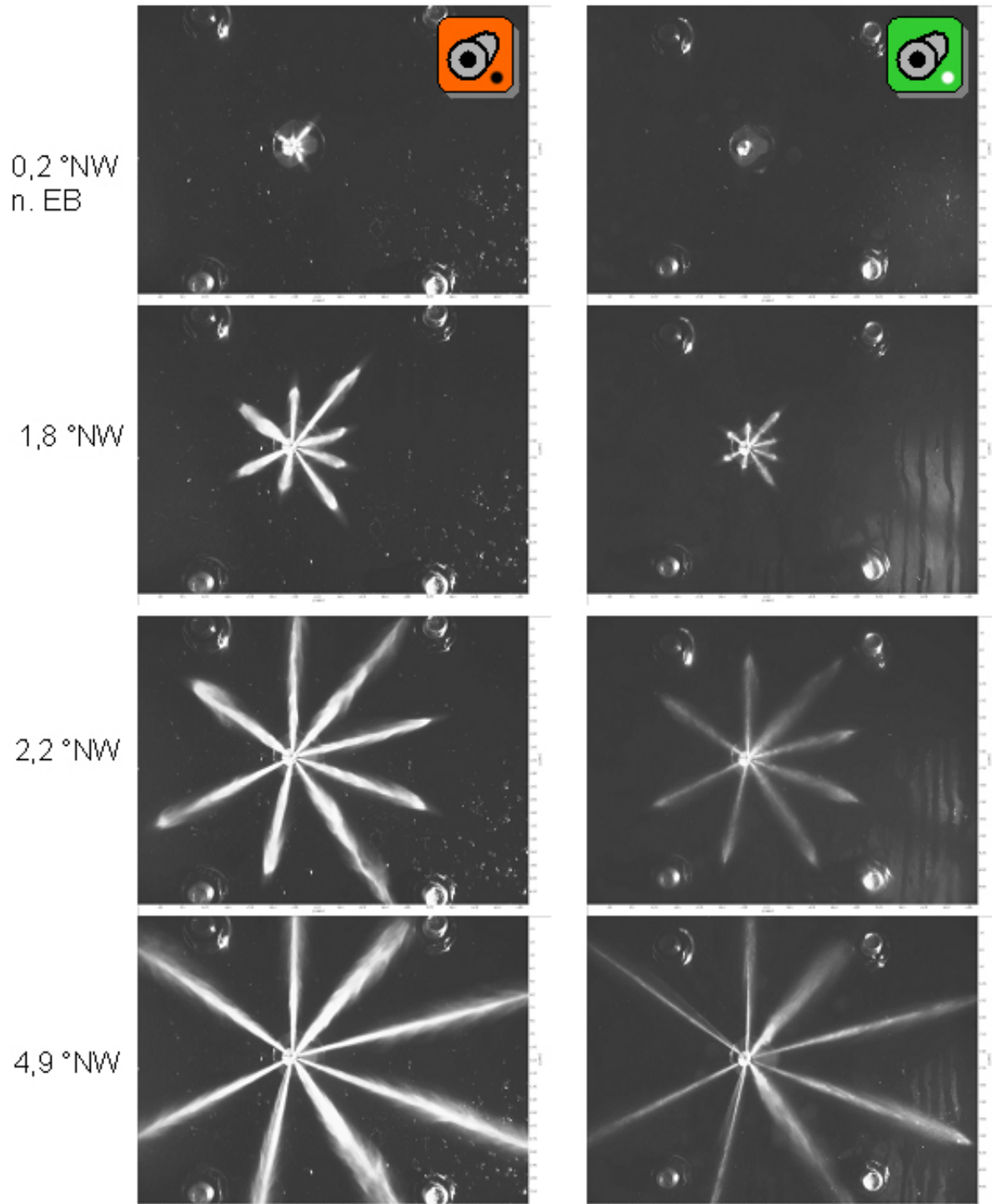


Abbildung 22: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel - Rapsöl bei 250 1/min und 20 °C (Streulichtaufnahme)

Zu Beginn des Einspritzvorgangs sind die Strahlen des Rapsöls teilweise eingeschnürt und weisen dickere Tropfen an ihrem Strahlanfang auf (siehe z. B. Rapsöl 0,6 °NW n. EB). Diese bilden sich mit zunehmender Ausbreitung zurück. Die Einspritzstrahlen von Dieseldieselkraftstoff weisen diese Einschnürung und die Tropfenform nicht auf, sie zeichnen sich hingegen durch eine gleichmäßige Keulenform aus, die letztendlich zu einer guten Zerstäubung des eingespritzten Kraftstoffes führt.

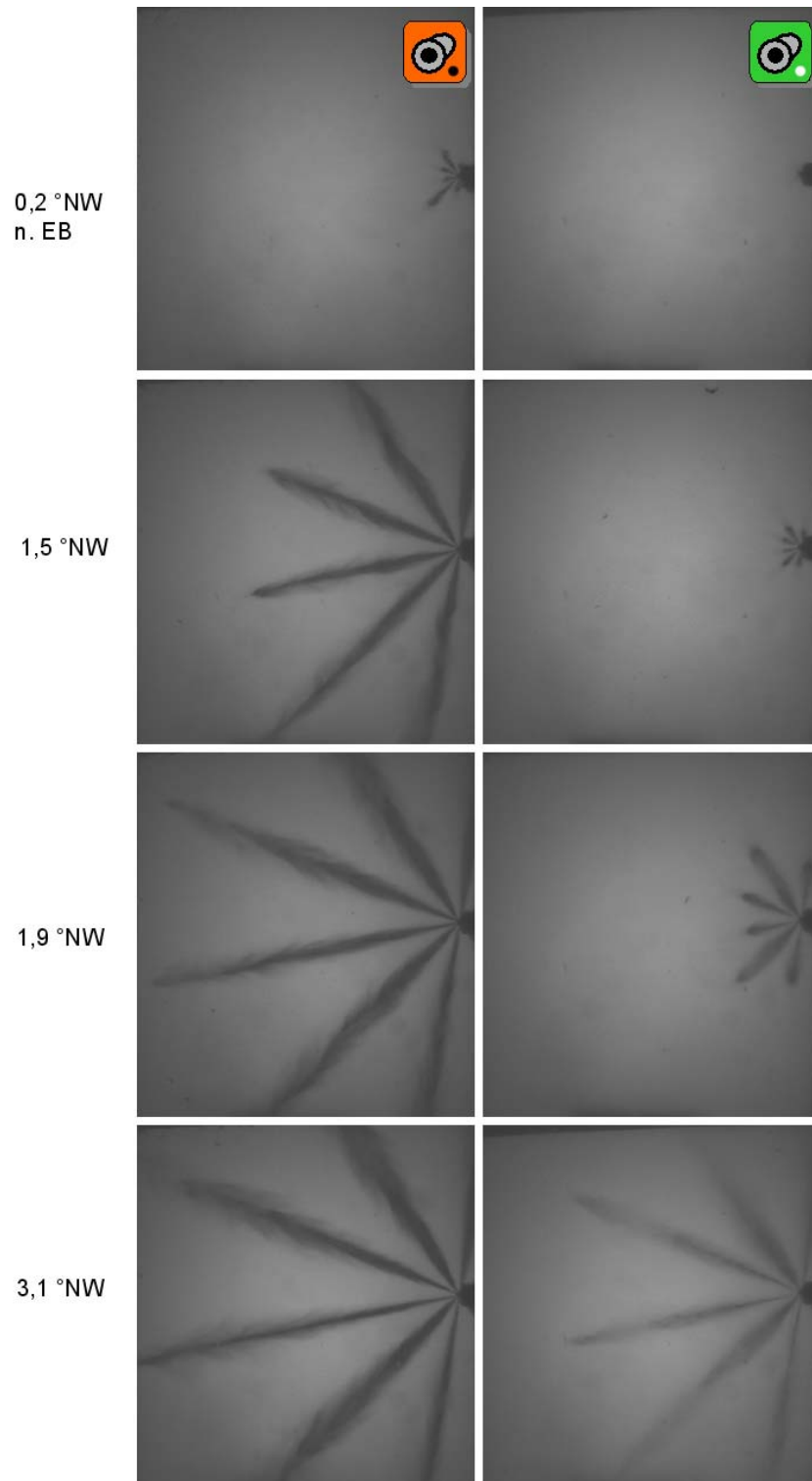


Abbildung 23: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel - Rapsöl bei 1.250 1/min und 20 °C Kraftstofftemperatur (Schattenrissaufnahme)



Bei höheren Drehzahlen, wie in Abbildung 23 aufgenommen mit der Schattenrisstechnik, zeigt sich ein vergleichbares Bild. Es sind die Untersuchungen bei 1.250 1/min aufgetragen, dies ist die Maximaldrehzahl (entspricht 2.500 1/min des Verbrennungsmotors).

Der Einspritzvorgang startet verspätet, auch bei dieser Drehzahl breiten sich die Einspritzstrahlen von Dieselkraftstoff schneller aus als die von Rapsöl. Einschnürung und Tropfenbildung der Einspritzstrahlen von kaltem Rapsöl sind weiterhin vorhanden, aber weitaus weniger stark ausgeprägt.

Die Betrachtung der vollständig ausgebreiteten Strahlbilder etwa 20 – 22 °NW nach Einspritzbeginn, lässt eine weitere Abweichung des Einspritzverhaltens von Rapsöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff erkennen. In Abbildung 24 sind die Strahlbilder der beiden Kraftstoffe bei 250 1/min, 20 °C aufgetragen. Beide Einspritzvorgänge haben in diesem Bild ihre maximale Ausbreitung erreicht. Die einzelnen Strahlen des Dieselkraftstoffes dringen etwa bis zum Beobachtungsrand der Aufnahme vor. Einige der Rapsölstrahlen spritzen dagegen über das Beobachtungsfenster hinaus, die Strahlänge ist verglichen zu der von Dieselkraftstoff erheblich verlängert. Durch die Verlängerung der Strahlen kann im Motorbetrieb der Einspritzstrahl auf die relativ kühle Zylinderwand treffen. Dort vermischt sich das Rapsöl mit dem Schmierölfilm auf der Zylinderwand und wird mit diesem gemeinsam in das Kurbelgehäuse gespült. Die Folgen der so entstehenden Motorölverdünnung bzw. der anschließenden Motorölverdickung sind in Kap. 4.3 beschrieben.

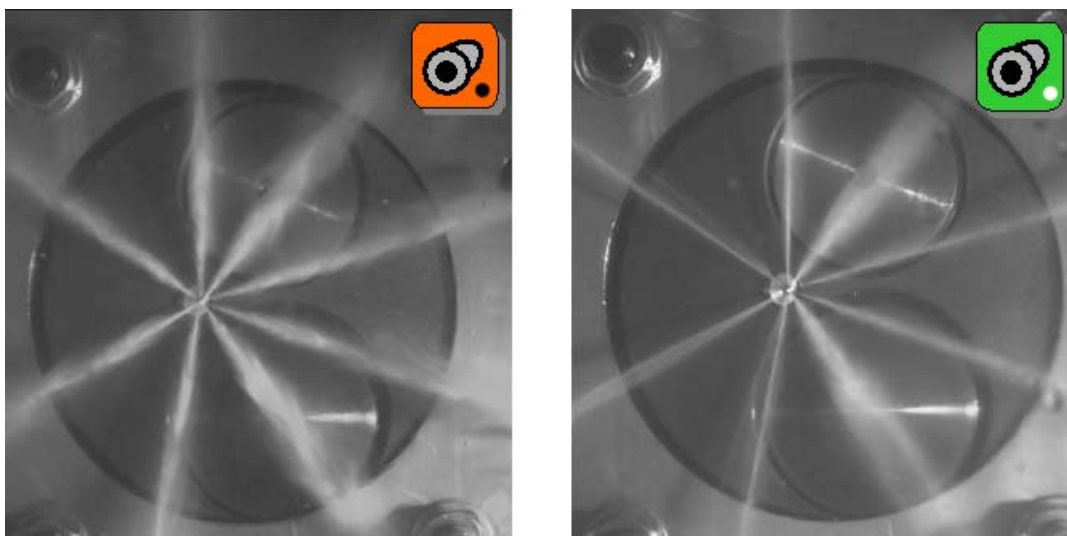


Abbildung 24: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel - Rapsöl, Verlängerung der Einspritzstrahlen (Streulichtaufnahme)

Aufgrund des hohen Druckes in der Einspritzdüse tritt der Kraftstoff mit hoher Geschwindigkeit und entsprechend hoher Turbulenz aus dem Düsenspritzloch aus. Ein Einspritzstrahl besteht aus einem Strahlkern mit größeren Tropfen und höherer Geschwindigkeit sowie einem diesen Kern umgebenden Strahlmantel aus feinen Tropfen mit höherem Luftanteil und entsprechend abnehmender Geschwindigkeit (Abbildung 25). Beim Ausbreiten des keulenförmigen Strahls wird der Strahlmantel durch zerfallende Tropfen des Kerns ständig ergänzt, während im Kern neu eingespritzte Teilchen nachstoßen. Die Strahlbreite nimmt mit zunehmender Eindringtiefe zu, wobei die Geschwindigkeit der Strahlspitze abnimmt [15].

Die Ausbreitung des Strahls wird beeinflusst durch:

- Austrittsgeschwindigkeit (hoher Einspritzdruck)
- Viskosität des Kraftstoffes
- Oberflächenspannung des Kraftstoffes

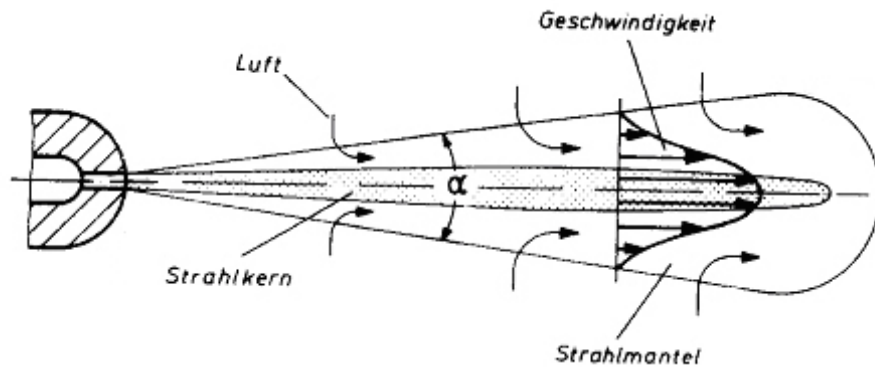


Abbildung 25: Einspritzstrahl, Schema [15]

In nicht vorgewärmten Zustand weist Rapsöl höhere Werte für Viskosität und Oberflächenspannung auf (Abbildung 6 und Abbildung 8) wodurch das Aufbrechen des Strahlkerns erschwert wird. Der Kern bleibt länger als eine Einheit erhalten, dies zeigt sich einerseits als Einschnürung des Querschnittes und andererseits als Verlängerung der Strahlen in den Aufnahmen der optischen Einspritzstrahluntersuchungen.

Bei der Analyse der physikalischen Eigenschaften von Rapsöl (Kap.4.2) wurde bereits erwähnt, dass sich die Werte für Viskosität und Oberflächenspannung bei der Erwärmung von Rapsöl an diejenigen von Dieselmotorkraftstoff angleichen. Die Auswirkung der Temperaturerhöhung von 20 °C über 50 °C auf 70 °C ist in Abbildung 26 ersichtlich.

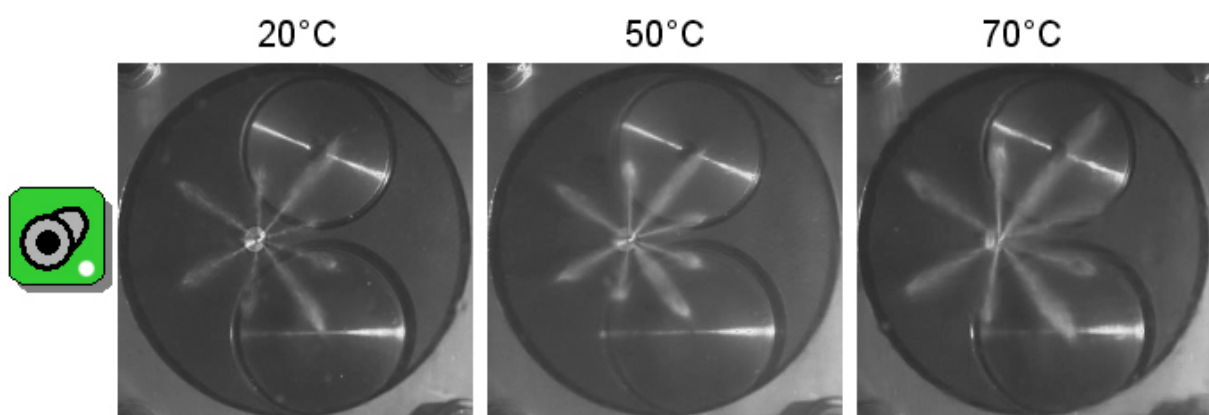


Abbildung 26: Nockengesteuertes System, Vergleich Rapsöl bei verschiedenen Kraftstofftemperaturen (500 1/min, 1 °NW n. EB.)

Die Erhöhung der Temperatur beeinflusst den zeitlichen Verzug der Einspritzung positiv und mit steigender Kraftstofftemperatur vergrößert sich auch die Länge der Einspritzstrahlen. Die Kraftstofferwärmung fördert zusätzlich die Ausbildung des Strahlmantels und reduziert gleichzeitig die Einschnürung der einzelnen Strahlen. Die tropfenähnliche Form der Spitze des Strahls nimmt ab.

Ein weiterer Vergleich der Auswirkung einer Temperaturerhöhung ist für geringe Drehzahl (250 1/min) in Abbildung 27 dargestellt. Die linke Spalte zeigt das nicht erwärmte Rapsöl als Referenz, wohingegen in der rechten Spalte der Einspritzvorgang von auf 70 °C erwärmtem Rapsöl aufgetragen ist. Referenzwert für die Nockenwellenstellung 0 °NW n. EB ist der Einspritzbeginn von Dieselmotorkraftstoff bei der entsprechenden Drehzahl.

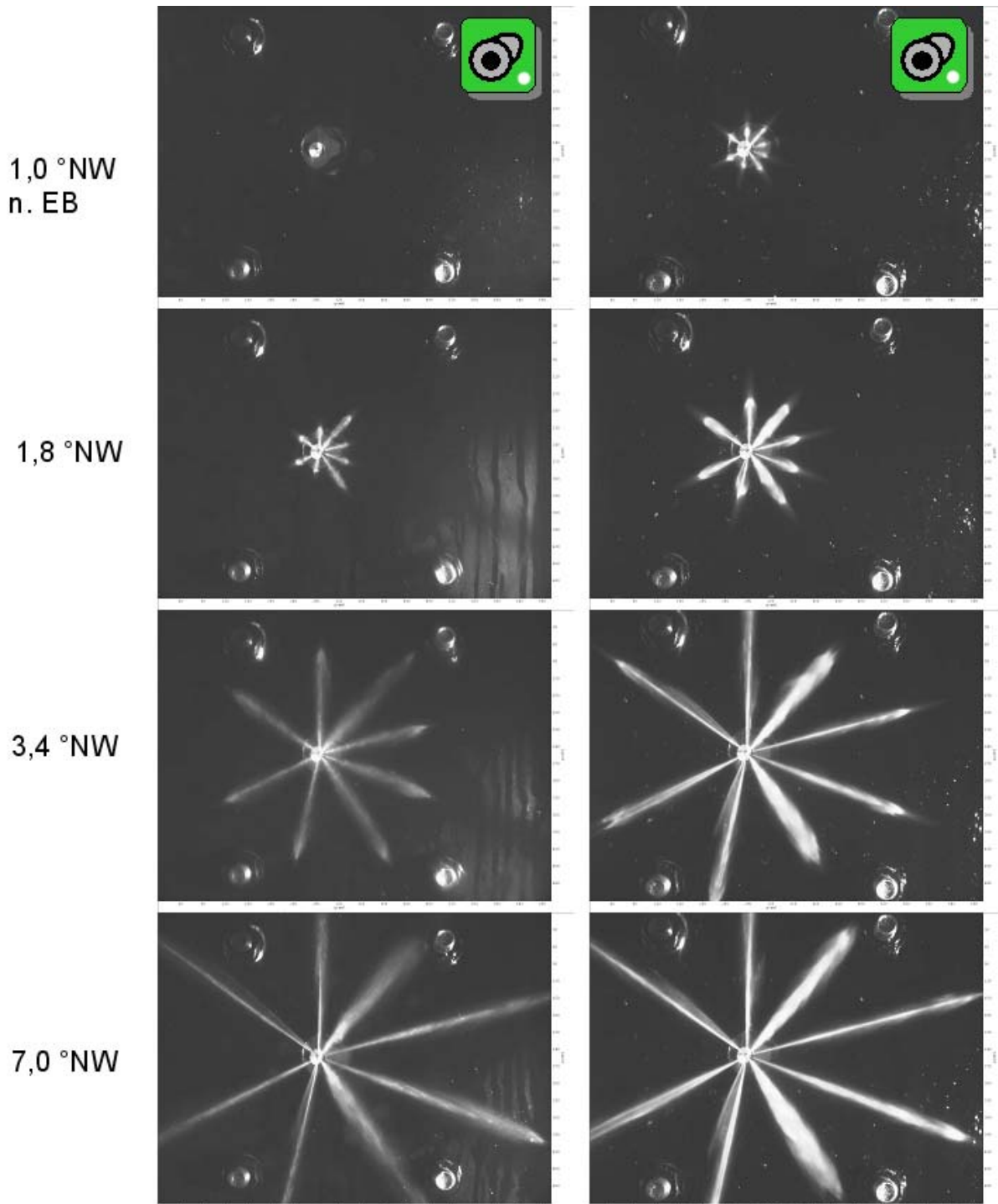


Abbildung 27: Nockengesteuertes System, Vergleich Rapsöl bei 20 (links) und 70 °C (rechts), 250 1/min (Streulichtaufnahme)

Die Erhöhung der Rapsöltemperatur reduziert einerseits den Startverzug und andererseits die Einschnürung der Einspritzstrahlen. Der Strahlmantel kann sich bei erwärmtem Kraftstoff besser

ausbilden. Bei komplett ausgebildetem Einspritzvorgang verringert sich dadurch auch die Verlängerung der Rapsölstrahlen. Deren hellere Intensität weist auf eine bessere Zerstäubung bei höheren Temperaturen hin.

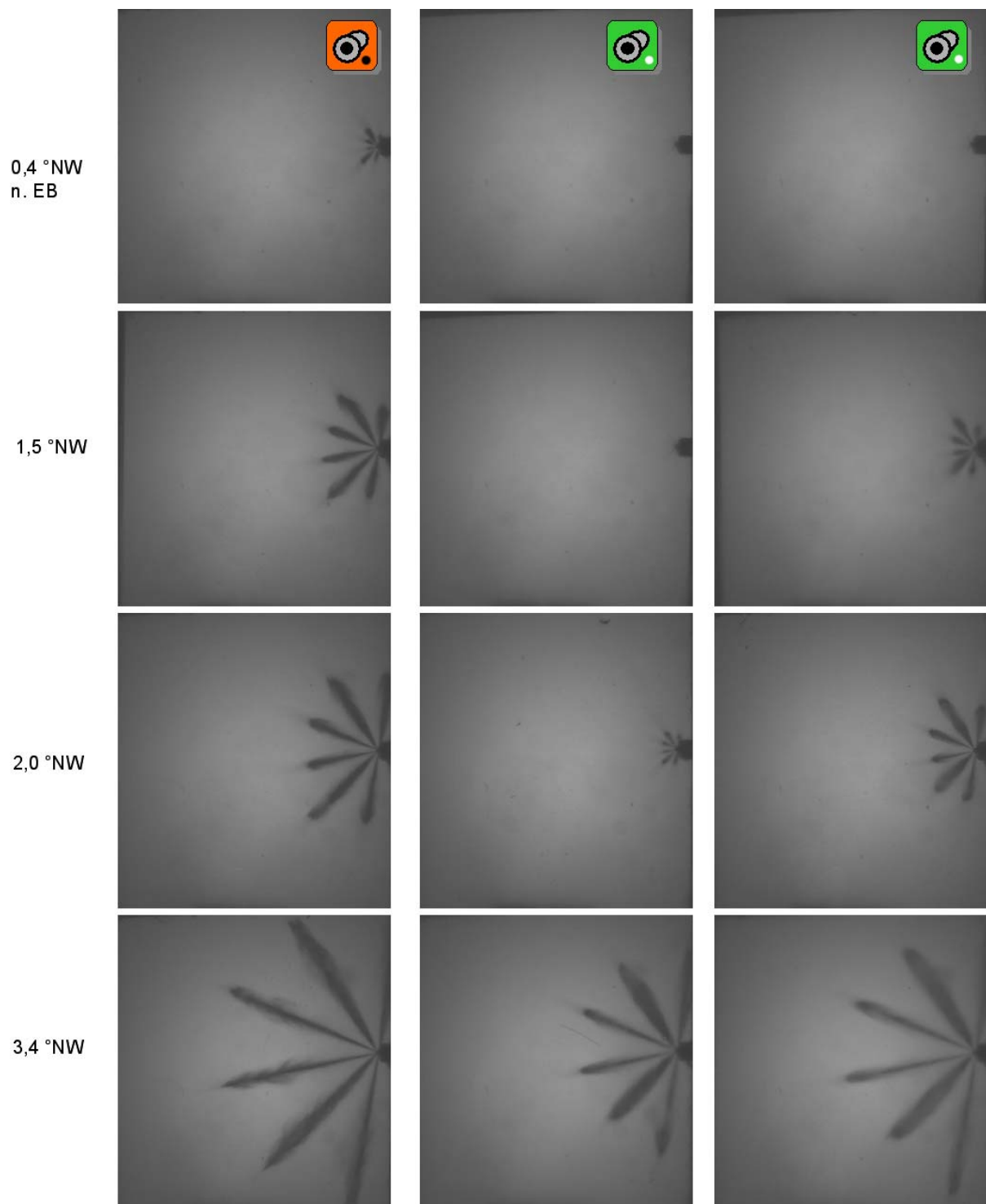


Abbildung 28: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel bei 20 °C und Rapsöl bei 20 und 70 °C, 1.250 1/min (Schattenrissaufnahme)

Der positive Einfluss der Temperatur lässt sich auch bei höheren Drehzahlen nachweisen. Abbildung 28 zeigt Untersuchungen bei einer Pumpendrehzahl von 1.250 1/min. Dieselkraftstoff mit 20 °C ist in der linken Spalte aufgetragen, in der Mitte sind die Bilder von kaltem (20 °C) und rechts die von

warmem (70 °C) Rapsöl abgebildet. Referenzwert der Nockenwellenstellung ist wiederum der Beginn des Einspritzvorgangs mit Dieselkraftstoff.

Der Vergleich zeigt, dass der Verzug von Einspritzbeginn und Ausbreitung der Einspritzstrahlen durch die Erwärmung des Kraftstoffes Rapsöl reduziert aber nicht beseitigt wird. Beträgt der Startverzug bei 20 °C kaltem Rapsöl im Vergleich zu dem von Diesel etwa 2 °NW bei 1.250 1/min, so kann dieser durch Vorwärmung des Rapsöls auf etwa 0,7 °NW reduziert werden.

Der Einspritzvorgang wird bei Verwendung von erwärmtem Rapsöl deutlich positiv beeinflusst. So kann der Verzug des Starts der Einspritzung verkleinert und die Form der Einspritzstrahlen verbessert werden. Durch Letzteres ist eine feinere Zerstäubung des Kraftstoffs möglich, diese trägt zur Optimierung der Gemischbildung bei.

### Common-Rail Einspritzsystem

Die Auswertung der optischen Untersuchungen werden für das Common-Rail System mit Bildern belegt, die an der Druckkammer aufgenommen wurden. In der Druckkammer ist, für andere Untersuchungen, eine Elektrode (Abbildung 29) angebracht, die sich nicht entfernen lässt. Diese Elektrode ist weit von der Spitze der Einspritzdüse entfernt, sodass keine Beeinträchtigungen des Einspritzvorgangs zu erwarten sind.

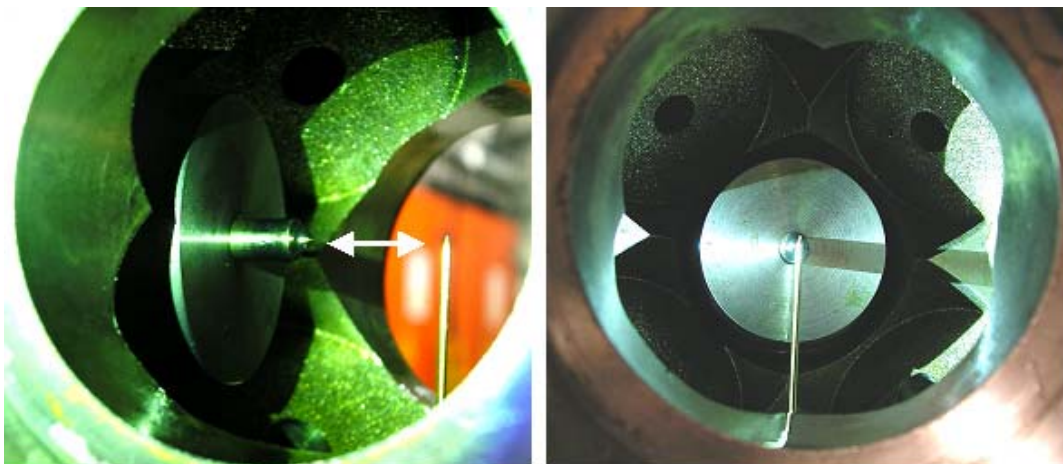


Abbildung 29: Elektrode in der Druckkammer

Da die Elektrode jedoch von der Blitzlampe ebenfalls angeleuchtet wird, erscheint auf den Fotografien ein heller vertikaler Streifen vom unteren Rand bis zur Mitte des Bildes.

Die Untersuchungen des Einspritzverlaufs mit Common-Rail System ergeben ähnliche Ergebnisse für das Temperaturverhalten von Rapsöl, wie diejenigen mit nockengesteuertem System.

Die einzelnen Aufnahmen in Abbildung 30 zeigen den Verlauf der Einspritzung von Diesel (links) und Rapsöl (rechts) bei einer Kraftstofftemperatur von jeweils 20 °C und 750 bar Einspritzdruck. Dieser

Einspritzdruck entspricht demjenigen von Heavy-Duty Dieselmotoren im Leerlauf. Sämtliche dargestellten Ergebnisse wurden bei konstanter Bestromungsdauer des Common-Rail Injektors von 2.000  $\mu\text{s}$  aufgenommen. Der Gegendruck in der Kammer betrug 50 bar, was dem Druck im Brennraum des Motors zum Zeitpunkt der Einspritzung entspricht.

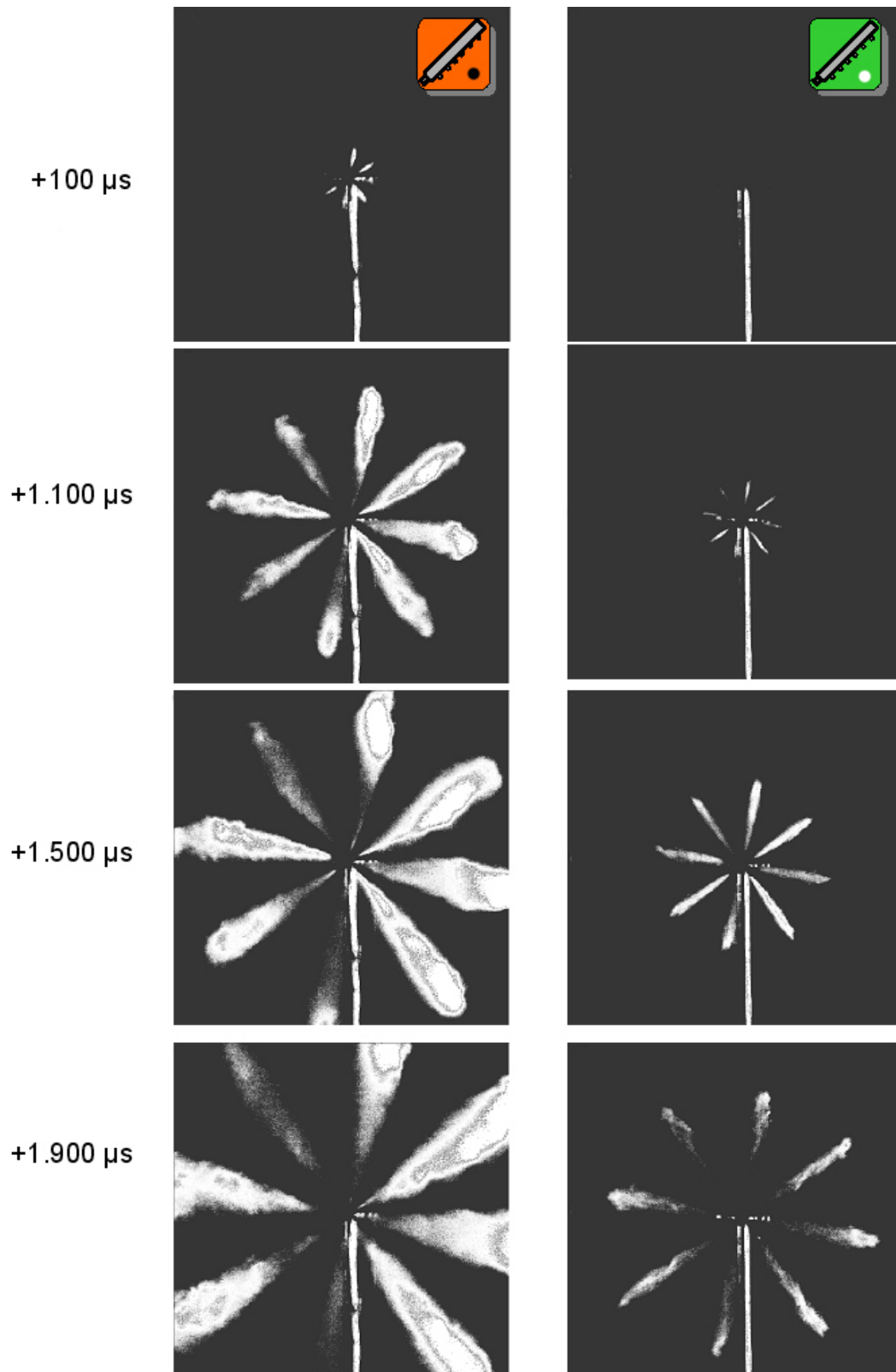


Abbildung 30: Common-Rail System, Vergleich Diesel - Rapsöl, 750 bar, 20 °C, 50 bar Kammerdruck (Streulichtaufnahme)

Der Einspritzvorgang mit Dieseldieselkraftstoff startet wie erwartet mit minimalem Verzögerung sofort nach dem Ansteuersignal der Common-Rail Anlage und breitet sich gleichmäßig im Beobachtungsraum aus. Die Versuche mit Rapsöl zeigen, wie diejenigen desnockengesteuerten Systems, auch beim Common-Rail System einen zeitlichen Delay für den Einspritzstart von Rapsöl. Bei einem Einspritzdruck von 750 bar verstreichen rund 1.000 bis 1.100  $\mu\text{s}$  zwischen Ansteuersignal und Beginn des Einspritzvorgangs von Rapsöl.

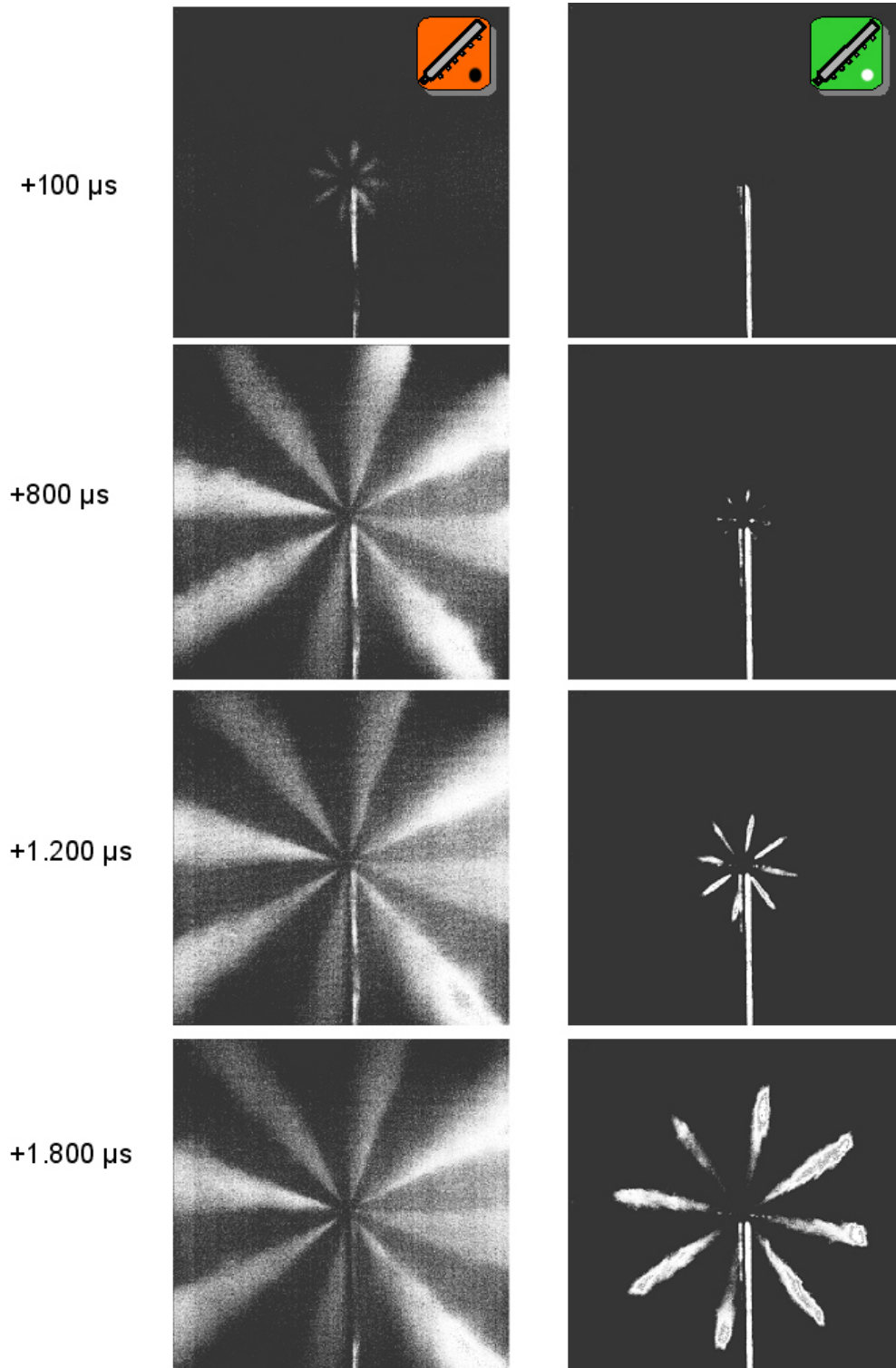


Abbildung 31: Common-Rail System, Vergleich Diesel - Rapsöl, 1.500 bar, 20 °C (Streulichtaufnahme)

Nach dem verzögerten Start der Einspritzung breiten sich die Rapsölstrahlen sehr viel weniger aufgefächert aus, auch hier tritt die bereits von den Versuchen mitnockengesteuertem System bekannte Einschnürung des Strahlbildes auf. Trotz dieser Einschnürung erreichen die Rapsölstrahlen während des gesamten Einspritzvorgangs jedoch nicht die Länge, wie sie das Strahlbild von Dieselkraftstoff vorgibt.

Die gefundenen Erkenntnisse haben für Kraftstoff mit niedriger Temperatur auch bei anderen Einspritzdrücken die gleiche Gültigkeit. Abbildung 31 beweist, dass bei einem Einspritzdruck von 1.500 bar der Verzug des Einspritzbeginns von Rapsöl weiterhin vorhanden ist, ebenso gilt auch hier, dass das Strahlbild von Dieselkraftstoff breiter auffächert und längere Einspritzstrahlen liefert.

Durch die Erwärmung des Rapsöls wird auch bei Common-Rail Systemen das Einspritzbild positiv beeinflusst. Die Einzelbilder in Abbildung 32 wurden bei 50 bar Kammerdruck und 1.500 bar Einspritzdruck aufgezeichnet. In der linken Spalte ist die Untersuchung mit Rapsöl bei 20 °C aufgetragen, wohingegen das Rapsöl in der rechten Spalte auf 70 °C erwärmt wurde.

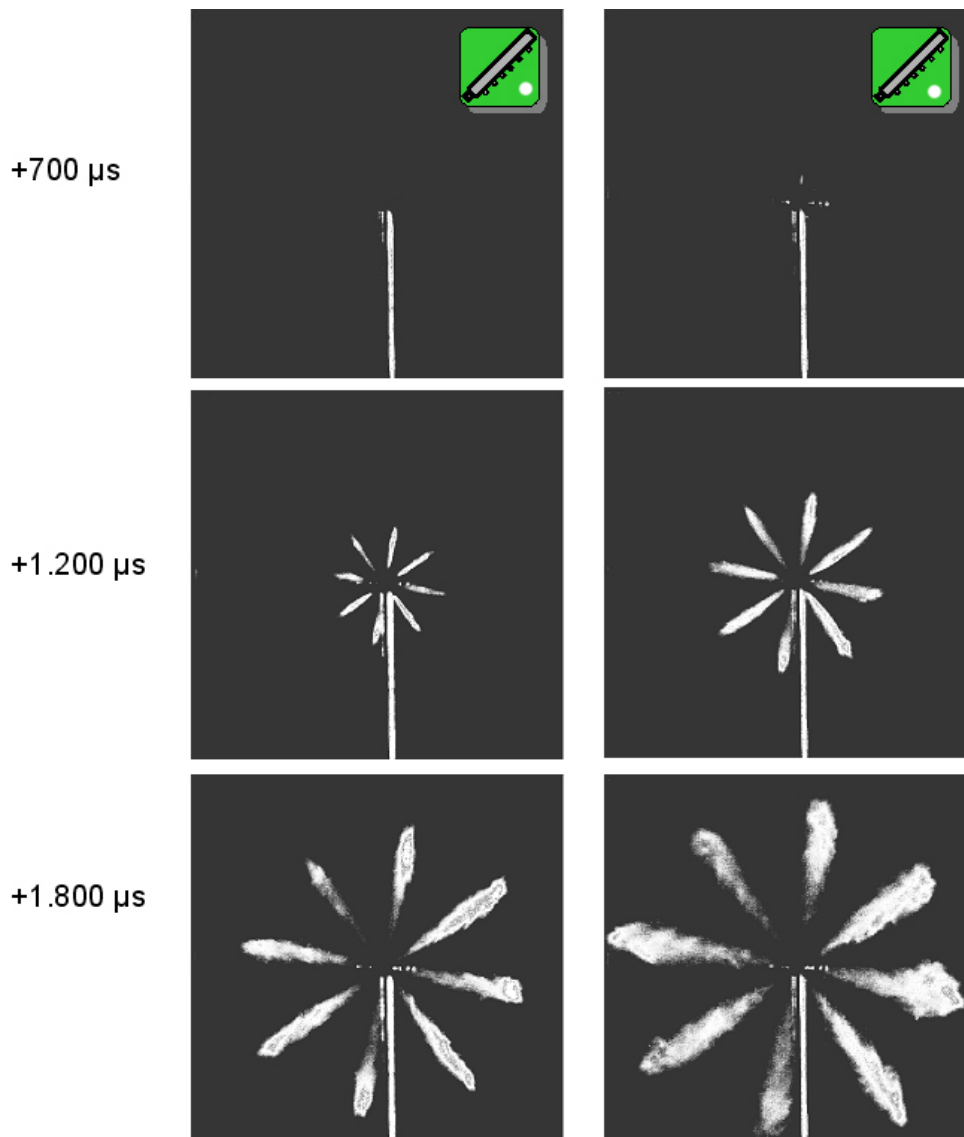


Abbildung 32: Common-Rail System, Vergleich Rapsöl, 1.500 bar, 20 (links) und 70 °C (rechts) (Streulichtaufnahme)



Im direkten Vergleich zeigt sich, dass das vorgewärmte Rapsöl einen Spritzverzug von lediglich 700  $\mu\text{s}$  gegenüber 800 ms bei kaltem Rapsöl aufweist. Weiterhin wird wie beimnockengesteuerten System durch die Erwärmung des Kraftstoffes auch die Ausbildung des Strahlmantels verbessert. Weist kaltes Rapsöl in der frühen Phase der Einspritzung noch einen recht deutlichen Strahlkern ohne Auffächerung auf, so kann bei warmem Rapsöl die stärkere Bildung eines Strahlmantels beobachtet werden. Die höhere Kraftstofftemperatur gewährleistet auch beim Common-Rail System eine Verbesserung des Strahlbilds von Rapsöl.

Wird Rapsöl vor dem Einspritzvorgang erwärmt, verbessert sich auch bei Verwendung des Common-Rail Systems das Einspritzverhalten. Mit steigender Temperatur verkürzt sich der Verzug des Einspritzbeginns nach Startsignal und die Auffächerung der einzelnen Einspritzstrahlen verbessert sich.

## 8.2 Drehzahlvariation

Eine Änderung der Pumpendrehzahl ist beimnockengesteuerten System direkt mit einer Veränderung des Einspritzdrucks verbunden. Bei größerer Drehzahl bewegt sich der Nocken und damit auch das von ihm angetriebene Pumpenelement schneller. Zwar bleibt bei konstanter Stellung der Regelstange das je Einspritzung geförderte Kraftstoffvolumen gleich, allerdings vergrößert sich der Volumenstrom des Kraftstoffes durch die Drosselstelle Einspritzdüsenloch entsprechend dem Anstieg der Drehzahl. Das hat den höheren Spritzendruck zur Folge.

Durch die feste Koppelung der Nockenwelle einer Reiheneinspritzpumpe an die Kurbelwelle des Verbrennungsmotors ergibt sich eine direkte und nicht variable Abhängigkeit der Pumpendrehzahl von der Motordrehzahl. So kann beimnockengesteuerten System im Gegensatz zu einem Common-Rail System der Einspritzdruck nicht unabhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors variiert und an die aktuellen Erfordernisse für die Verbrennung angepasst werden. Generell gilt:

Je höher die Motordrehzahl ist, desto größer ist auch der Einspritzdruck.

Da diese feste Beziehung auch für den Praxisbetrieb Bestand hat, wurden die Untersuchungen des Einspritzverhaltens von Rapsölnockengesteuerten Systems nicht im Hinblick auf eine Variation des Einspritzdrucks, sondern auf die Auswirkungen durch die Veränderung der Drehzahl durchgeführt.

Als Orientierung dient der MAN D2866 Dieselmotor, wie er in dem Eisenbahntriebwagen RegioShuttle eingebaut ist. Die Leerlaufdrehzahl dieses Motors liegt bei 500 1/min, die Maximaldrehzahl ist 2.500 1/min. Da es sich um einen Viertakt-Motor handelt, ergibt sich für die Untersuchungen an der Reiheneinspritzpumpe ein Drehzahlband von 250 bis 1.250 1/min. Dies wurde in Schritten zu jeweils 250 1/min analysiert.

Die Zeit, die das Einspritzsystem benötigt, um den Kraftstoff im Pumpenelement auf den Öffnungsdruck der Einspritzdüse zu komprimieren, ist bei unterschiedlichen Drehzahlen annähernd konstant. Bei höheren Drehzahlen bewegt sich die Nockenwelle jedoch schneller, sodass der optisch

erfassbare Beginn des Einspritzvorgangs bezogen auf die Nockenwellenstellung nach spät verschoben wird.

In Tabelle 1 sind die Einspritzverzüge von Diesel, kaltem und warmem Rapsöl exemplarisch für drei Drehzahlen aufgestellt. Als Beginn des Einspritzvorgangs auf den alle Werte bezogen werden, ist der optisch detektierte Beginn der Einspritzung von Diesel bei 250 1/min als Referenzwert festgelegt. Alle angegebenen Werte stellen den Verzug ausgehend von diesem Referenzwert dar. Die Werte in Klammern sind gerundet die auf die jeweilige Drehzahl umgerechnete Zeitspanne.

Durch Messungenauigkeiten variieren die Werte etwa um  $\pm 0,2$  °NW.

	250 1/min	750 1/min	1.250 1/min
Diesel	0 °NW	1,2 °NW (260 $\mu$ s)	2,4 °NW (320 $\mu$ s)
Rapsöl 20 °C	1,5 °NW (1.000 $\mu$ s)	2,7 °NW (600 $\mu$ s)	4,3 °NW (570 $\mu$ s)
Rapsöl 70 °C	1,0 °NW (660 $\mu$ s)	1,9 °NW (420 $\mu$ s)	3,4 °NW (450 $\mu$ s)

Tabelle 1: Verzug Einspritzbeginn bei Diesel und Rapsöl

Die optischen Analysen ergeben, dass sich der Spritzbeginn von Dieselmotorkraftstoff je 250 1/min um etwa 0,6 °NW nach spät verschiebt, so dass bei 1.250 1/min der Einspritzbeginn 2,4 °NW später als bei 250 1/min startet.

Diese Aussage trifft grundsätzlich auch auf Rapsöl zu. Sowohl bei kaltem als auch bei erwärmtem Pflanzenöl tritt der Einspritzbeginn bei Höchstdrehzahl etwa 2,8 (Rapsöl 20 °C) bzw. 2,6 °NW (Rapsöl 70 °C) später ein als bei Leerlauf und entsprechender Kraftstofftemperatur. Der Verlauf zwischen den Drehzahlgrenzen ist jedoch nicht gleich linear wie bei Diesel. Je höher die Drehzahl ist, desto später startet bei Rapsöl der Einspritzvorgang.

Werden die Ergebnisse der Drehzahlvariation mit denen der Temperaturerhöhung aus Kap. 8.1 verknüpft. So zeigt sich, dass die Erwärmung des Rapsöls den Startverzug der Einspritzung bei allen Drehzahlen positiv beeinflusst. Bei niedrigen Drehzahlen bewirkt die Erwärmung des Rapsöls allerdings eine geringere Verschiebung der Spätverlegung des Einspritzbeginns mit Rapsöl als bei hohen Drehzahlen.

Nach dem Start des Einspritzvorgangs erfolgt mit steigender Drehzahl eine verbesserte Ausbreitung des Rapsöls. In Abbildung 33 sind beispielhaft Einspritzverläufe von 50 °C warmem Rapsöl bei 250, 750 und 1.250 1/min dargestellt. Für eine Vergleichbarkeit sind die Aufnahmen zu gleichen Nockenwellenstellungen nach Beginn der jeweiligen Einspritzung abgebildet.

Die bereits bekannten Einschnürungen der meisten Einspritzstrahlen reduzieren sich, wodurch die Bildung des Strahlmantels gefördert wird. Auffällig ist, dass sich die Drehzahlerhöhung auf einzelne Strahlen unterschiedlich auswirkt. So ist für die beiden linken Einspritzstrahlen eine Verbesserung in Bezug auf die Strahlmantelbildung erkennbar, wohingegen der mittlere obere Einspritzstrahl weiterhin eine ausgeprägte Einschnürung aufweist und sich mit steigender Drehzahl lediglich weiter verlängert.

Die Neigung zur Tropfenbildung am vorderen Ende der Strahlen nimmt gleichsam mit steigender Drehzahl leicht ab.

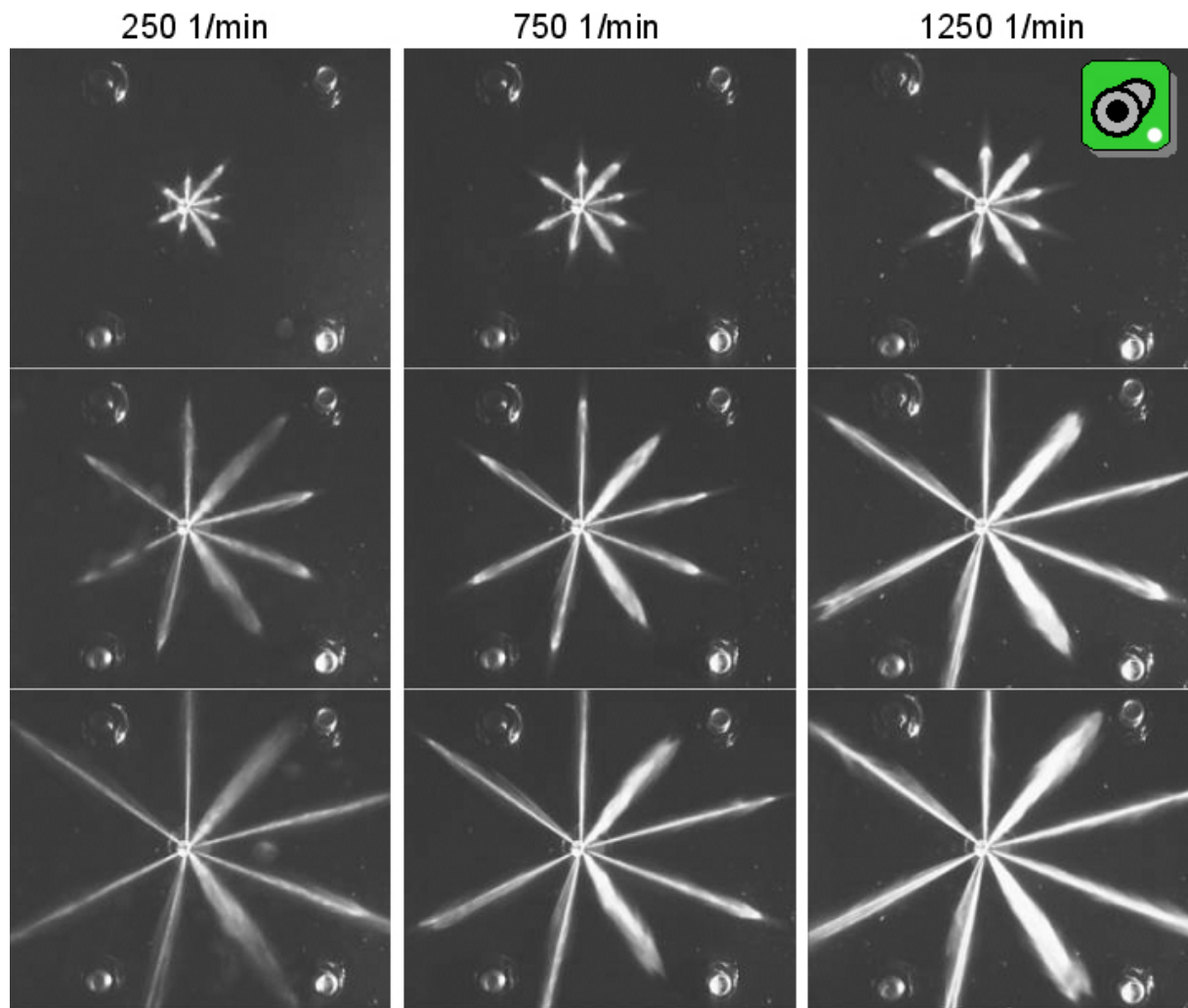


Abbildung 33: Nockengesteuertes System, Rapsöl bei Drehzahl von 250 (links), 750 (Mitte) und 1.250 1/min (rechts), 50 °C (Streulichtaufnahme)

Die durch eine Erhöhung der Drehzahl bedingte Steigerung des Einspritzdrucks wirkt sich positiv auf die Strahlausbreitung und die Zerstäubung aus. Der Verzug des Einspritzbeginns verkleinert sich, die Auffächerung der Einspritzstrahlen und damit auch die Zerstäubung des Kraftstoffs verbessert sich. Da die Drehzahl der Reiheneinspritzpumpe konstruktiv an die Motordrehzahl gekoppelt ist, wirken sich die Verbesserungen der Kraftstoffaufbereitung nicht auf den Leerlauf, sondern nur auf Lastpunkte in höheren Drehzahlen aus.

Der Bereich niedriger Drehzahlen kann jedoch mittels Vorwärmung des Kraftstoffs (vgl. Kap. 8.1) optimiert werden.

### 8.3 Druckvariation

Einer der wesentlichen Vorteile des Common-Rail Systems ist die Möglichkeit, den Einspritzdruck unabhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors einstellen zu können. Für den Fall, dass die Steigerung des Einspritzdrucks auch beim Common-Rail System die Strahlausbreitung von Rapsöl verbessert, ist damit die Möglichkeit gegeben, durch Druckerhöhung auch bei niedrigen Drehzahlen eine verbesserte Kraftstoffaufbereitung zu erzielen.

Die dargestellten Ergebnisse wurden bei drei verschiedenen Einspritzdrücken, 750, 1.000 und 1.500 bar, gewonnen. Die Bestromungsdauer des Injektors beträgt 2.000  $\mu\text{s}$ , der Gegendruck in der Einspritzkammer 50 bar.

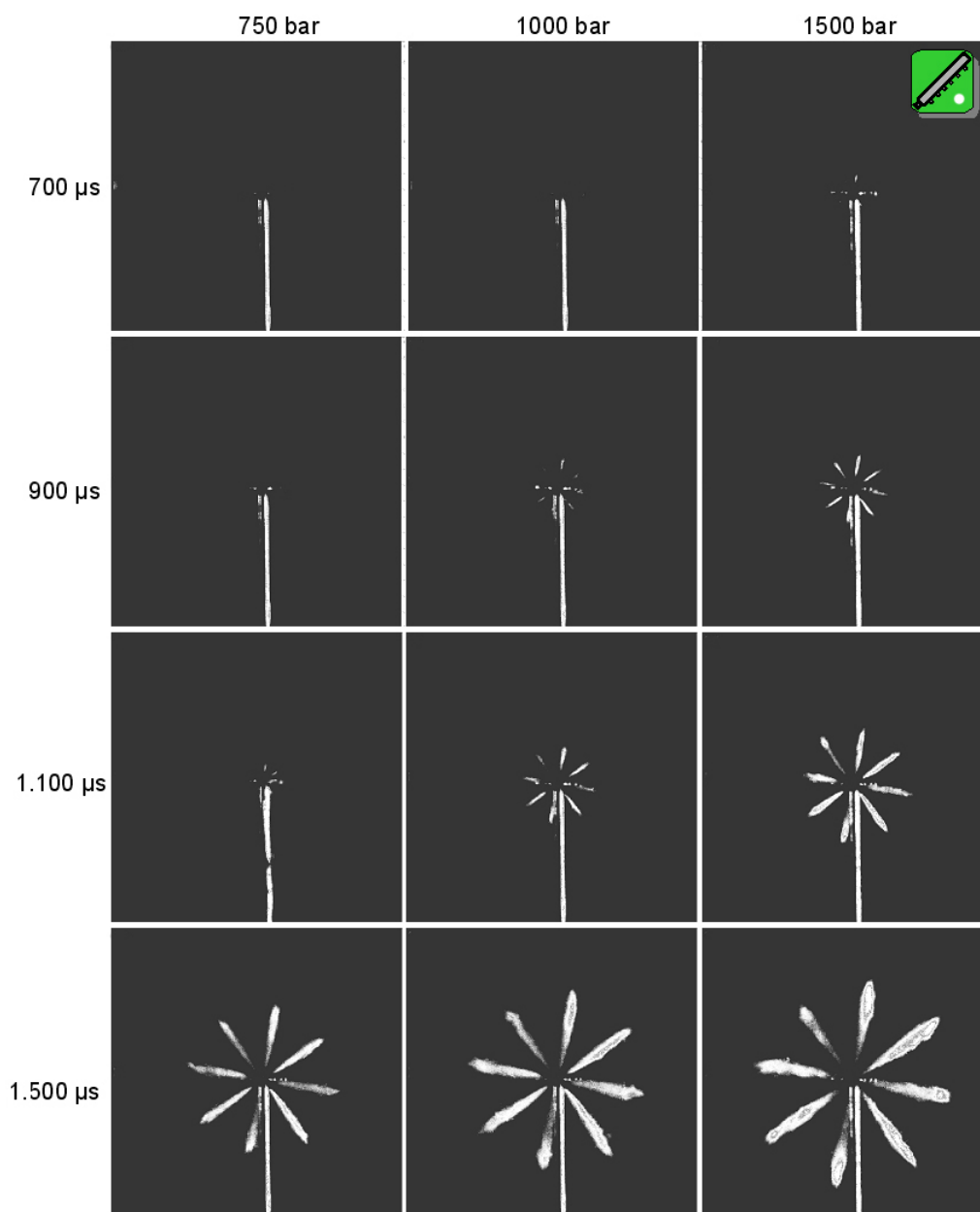


Abbildung 34: Common-Rail System, Vergleich Rapsöl bei 750 (links), 1.000 (Mitte) und 1.500 bar (rechts) (Streulichtaufnahme)

Die Steigerung des Einspritzdrucks verringert, wie beim Nocken-gesteuerten Einspritzsystem, den Verzug des Einspritzbeginns bei Verwendung von Rapsöl. Allerdings fällt der zeitliche Unterschied

des Spritzbeginns zwischen den unterschiedlichen Einspritzdrücken nicht so groß aus, wie bei dem nockengesteuerten System bekannt. Der Beginn des Einspritzvorgangs bei verschiedenen Messreihen mit gleichen Einstellungen variiert um etwa  $\pm 100 \mu\text{s}$ .

Die Kombination aus Druck- und Temperaturerhöhung liefert zusätzlich eine leichte Verringerung des Einspritzdelays um rund  $100 \mu\text{s}$  für jeden Einspritzdruck.

	750 bar	1.000 bar	1.500 bar
Rapsöl 20 °C	1.000 – 1.100 $\mu\text{s}$	800 - 900 $\mu\text{s}$	700 - 800 $\mu\text{s}$
Rapsöl 70 °C	900 – 1.000 $\mu\text{s}$	700 – 800 $\mu\text{s}$	600 - 700 $\mu\text{s}$

Tabelle 2: Einspritzverzug bei unterschiedlichen Einspritzdrücken

Neben dem Einfluss auf den Einspritzbeginn wirkt sich die Erhöhung des Einspritzdrucks auch auf die Ausbreitung des Strahlbildes nach Start des Einspritzvorgangs aus. In Abbildung 35 sind Momentaufnahmen einzelner Einspritzvorgänge aufgetragen. Exemplarisch sind dabei drei Einspritzdrücke zu gleichen Zeitpunkten nach Spritzbeginn kombiniert. Der Innendruck der Druckkammer wurde auf 50 bar eingestellt, das Rapsöl war auf 70 °C erwärmt.

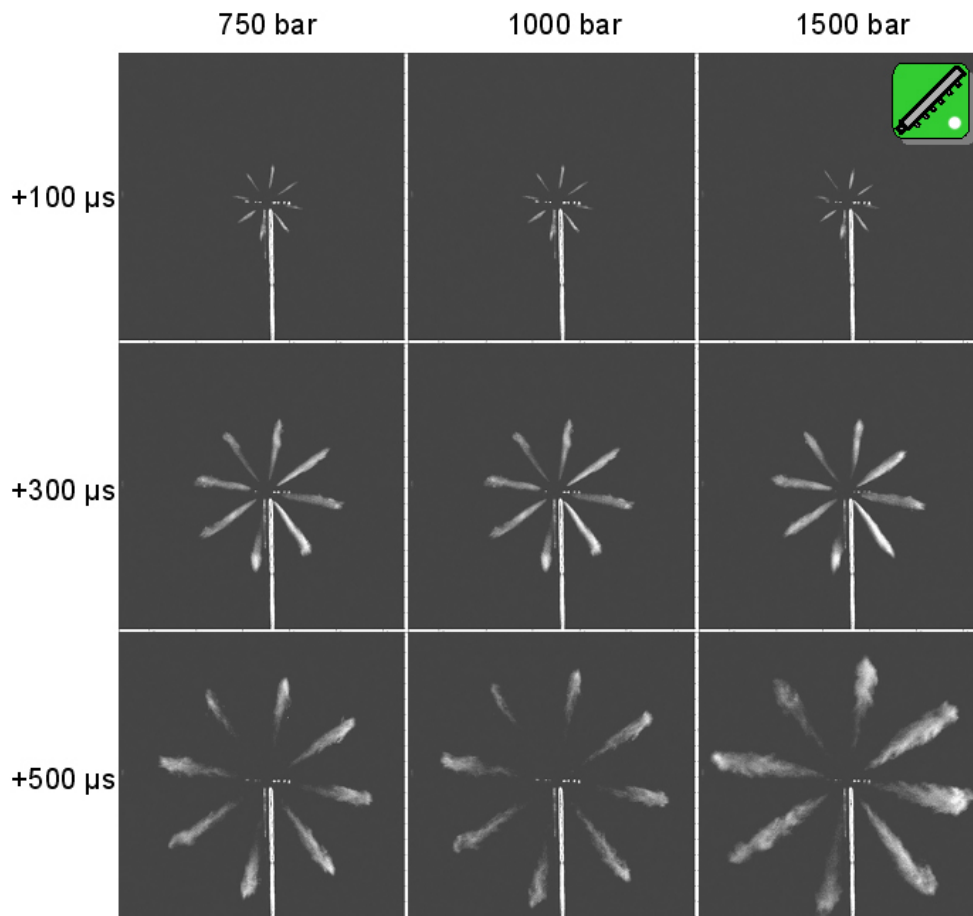


Abbildung 35: Common-Rail System, Vergleich Rapsöl, 750 (links), 1.000 (Mitte) und 1.500 bar (rechts), 50 °C (Streulichtaufnahme)

Die Abbildung zeigt auf, dass sich die Erhöhung des Einspritzdrucks nicht sofort auf die Ausbreitung der Strahlen auswirkt. In der ersten Phase nachdem die ersten Tropfen das Düsenloch verlassen, sind bei unterschiedlichen Einspritzdrücken keine Unterschiede der Strahlbilder zu erkennen. Erst etwa 400 – 500  $\mu\text{s}$  nach Einspritzbeginn verbessert sich das Auffächern der Einzelstrahlen mit zunehmendem Einspritzdruck. So vergrößert sich der Kegelöffnungswinkel der Strahlen 500  $\mu\text{s}$  nach Einspritzbeginn bei 1.500 bar Einspritzdruck deutlich verglichen zu dem bei 750 bar.

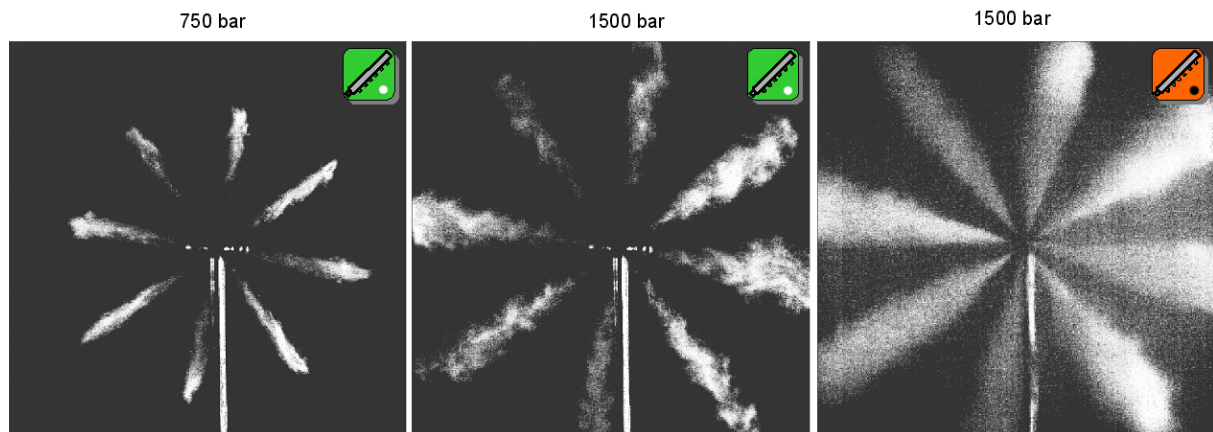


Abbildung 36: Strahlbild kurz vor Ende Einspritzvorgang, Rapsöl bei 750 und 1.500 bar, Diesel bei 1.500 bar

Trotz aller Verbesserungen durch Temperatur- und Druckerhöhung erreicht das Strahlbild von Rapsöl nicht die Qualität des Dieselmotorkraftstoffs. Abbildung 36 stellt den Zustand der Strahlausbreitung kurz vor Ende des jeweiligen Einspritzvorgangs dar und zeigt Rapsöl mit 70 °C bei 750 und 1.500 bar Einspritzdruck sowie Diesel mit 20 °C bei 1.500 bar. Die Druckerhöhung von 750 auf 1.500 bar vergrößert den Strahlwinkel der Rapsölstrahlen beträchtlich, allerdings weist Diesel ebenfalls bei 1.500 bar (rechtes Teilbild) einen nochmals vergrößerten Strahlöffnungswinkel auf. Durch die Lichtreflexion an bereits aus den Einspritzstrahlen heraus gelösten feinen Kraftstofftröpfchen entsteht der bei Diesel zu sehende helle, nebelartige Schleier auf dem Bild. Dieser belegt, dass vorgewärmtes Rapsöl auch bei hohen Einspritzdrücken weniger gut zerstäubt als Diesel und somit die Gemischbildung für die im Motoreinsatz nachfolgende Verbrennung nicht ähnliche Qualität aufweist.

#### 8.4 Einspritzdauervariation

Die in den vorhergehenden Kapiteln präsentierten Ergebnisse der optischen Untersuchungen am Common-Rail System wurden bei einer konstanten Ansteuerdauer des Injektors von 2.000  $\mu\text{s}$  aufgenommen. Dies entspricht einem Motorbetrieb bei Halblast. Eine Variation dieses Wertes wirkt sich nicht auf die grundsätzlichen Aussagen der bereits präsentierten Ergebnisse aus (Abbildung 37). Eine Veränderung der Einspritzdauer wirkt sich nicht auf den Startverzug des Einspritzbeginns aus. Die Qualität der Strahlaufächerung wird nur dahin gehend beeinflusst, dass bei längerer Einspritzdauer (längere Ansteuerung des Injektors) mehr Kraftstoff eingebracht wird. Dadurch steht mehr Kraftstoffmenge für die Zerstäubung zur Verfügung, sodass sich die Einspritzstrahlen von Rapsöl voluminöser darstellen. Der direkte Vergleich zwischen Rapsöl- und Dieseleinspritzung bei

gleich verlängerten oder verkürzten Ansteuerzeiten zeigt durchgehend ein schlechteres Strahlbild für Rapsöl, so wie es in Kap. 8.1 und 8.3 bereits für das Common-Rail System beschrieben wurde.

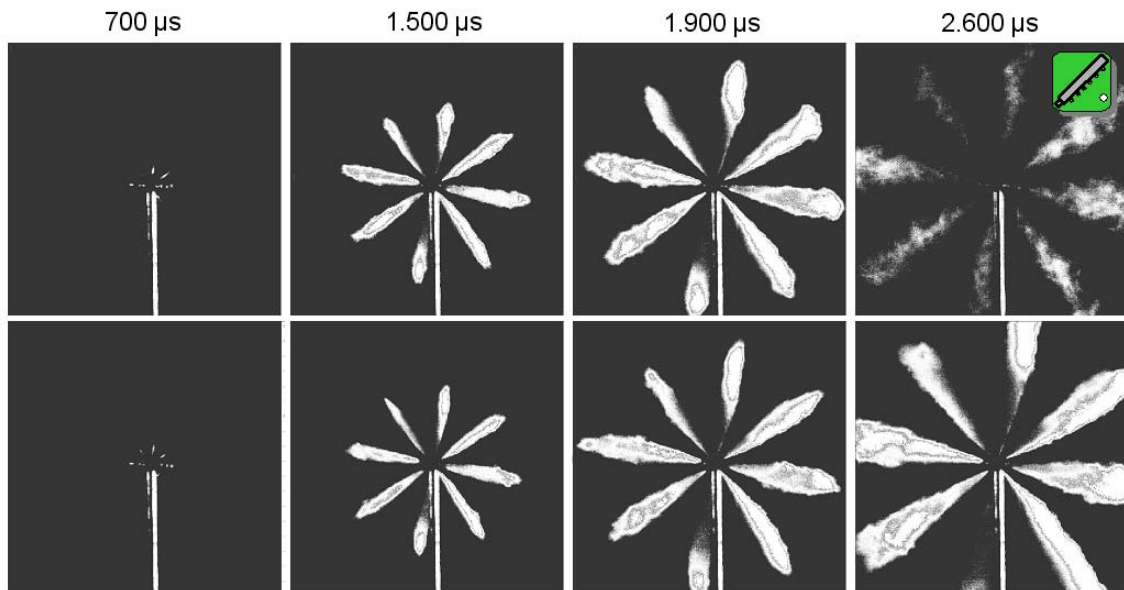


Abbildung 37: Common-Rail System, Rapsöl bei 1.500 bar, 70 °C und 2.000 (oben) bzw. 3.000  $\mu$  (unten) Bestromungszeit

## 8.5 Kammerdruckvariation

Im realen Praxisbetrieb saugt ein Dieselmotor Luft an und verdichtet diese in der Kompressionsphase. Durch Drossel effekte im Ansaugtrakt und Wärmeverlust beim Komprimieren variiert der Kompressionsenddruck bei unterschiedlichen Drehzahlen. Erst gegen Ende des Verdichtungsstaktes wird der Kraftstoff eingespritzt.

Die Untersuchungen der Strahlausbreitung von Rapsöl wurden in der Druckkammer bei verschiedenen, dieselmotortypischen Gegendrücken untersucht. Um ein Entzünden des Kraftstoffs zu verhindern, wurde die Kammer dafür mit Stickstoff gefüllt und unter einen Druck von 20, 40 und 50 bar Kammerdruck gesetzt. Dies entspricht gängigen Kompressionsdrücken in Heavy-Duty Dieselmotoren. Zusätzlich zu diesen Druckwerten wurden alle Messreihen bei Atmosphärendruck (0 bar) aufgenommen. Dies ermöglicht die Beurteilung, ob auch die Ergebnisse der Untersuchungen an der Atmosphärenkammer qualitativ auf die realen Bedingungen übertragbar sind.

In Abbildung 38 sind stellvertretend für die Untersuchungen die Einspritzverläufe von Rapsöl bei Atmosphärendruck und 50 bar Kammerdruck dargestellt. Der Einspritzdruck beträgt 750 bar, die Kraftstofftemperatur wurde auf 20 °C eingestellt.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits der Einfluss der Kraftstofftemperatur und des Einspritzdrucks auf den zeitlichen Verzug des Einspritzbeginns von Rapsöl gegenüber Dieselkraftstoff analysiert. Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen exemplarisch, dass eine Veränderung des Kammerinnendrucks weder bei hohen noch niedrigen Einspritzdrücken oder Kraftstofftemperaturen eine Auswirkung auf den Verzug des Spritzbeginns von Rapsöl besitzt. Der Einspritzvorgang mit

Rapsöl startet bei unterschiedlichen Druckzuständen in der Kammer immer zum gleichen Zeitpunkt nach dem Ansteuersignal. Für die exakten Zeitwerte bei unterschiedlichen Kraftstofftemperaturen und Einspritzdrücken hat weiterhin Tabelle 2 Gültigkeit.

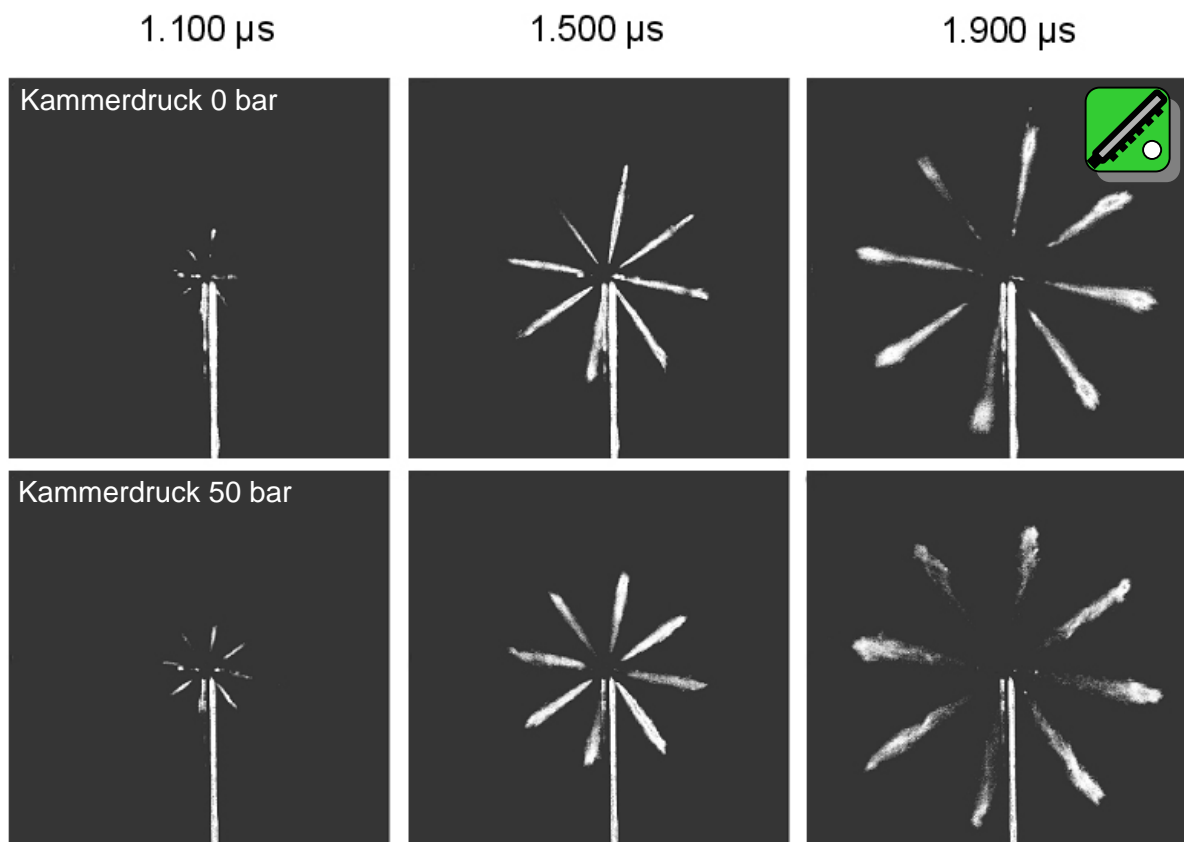


Abbildung 38: Kammerdruckvariation 0 (oben) und 50 bar (unten), Rapsöl 20 °C, 750 bar

Die Auffächerung der Einspritzstrahlen wird hingegen sehr wohl von dem Kammerinnendruck beeinflusst. In Abbildung 38 sind bei Atmosphärendruck schon 400 µs nach Einspritzstart deutlich dünnere Einspritzstrahlen zu erkennen als bei einem Gegendruck von 50 bar. Diese Entwicklung der Ausbreitung der Einspritzstrahlen setzt sich fort, sodass vor Ende der Kraftstoffeinspritzung (1.900 µs) eine deutliche Tropfenbildung an der Spitze der Einspritzstrahlen und eine weitere Einschnürung derselben zu erkennen sind.

Diese Tendenz nimmt mit steigenden Einspritzdrücken zu. So sind in Abbildung 39 bereits bei 1.500 µs nach Ansteuersignal deutliche Einschnürungen und Tropfenbildung an den Einspritzstrahlen zu erkennen.

Zusätzlich werden die Einspritzstrahlen bei geringerem Gegendruck und hohem Einspritzdruck extrem verlängert.

Unterschiedliche Drücke in der Einspritzkammer (bzw. im realen Motor) haben keinen Einfluss auf die Verschleppung des Einspritzbeginns bei der Verwendung von Rapsöl. Auf die Entwicklung des Strahlbildes nach dem Start des Einspritzvorgangs wirken sich höhere Brennraumdrücke förderlich aus. Im Verbrennungsmotor treten hohe Kompressionsdrücke bei niedrigen Drehzahlen auf. In diesen



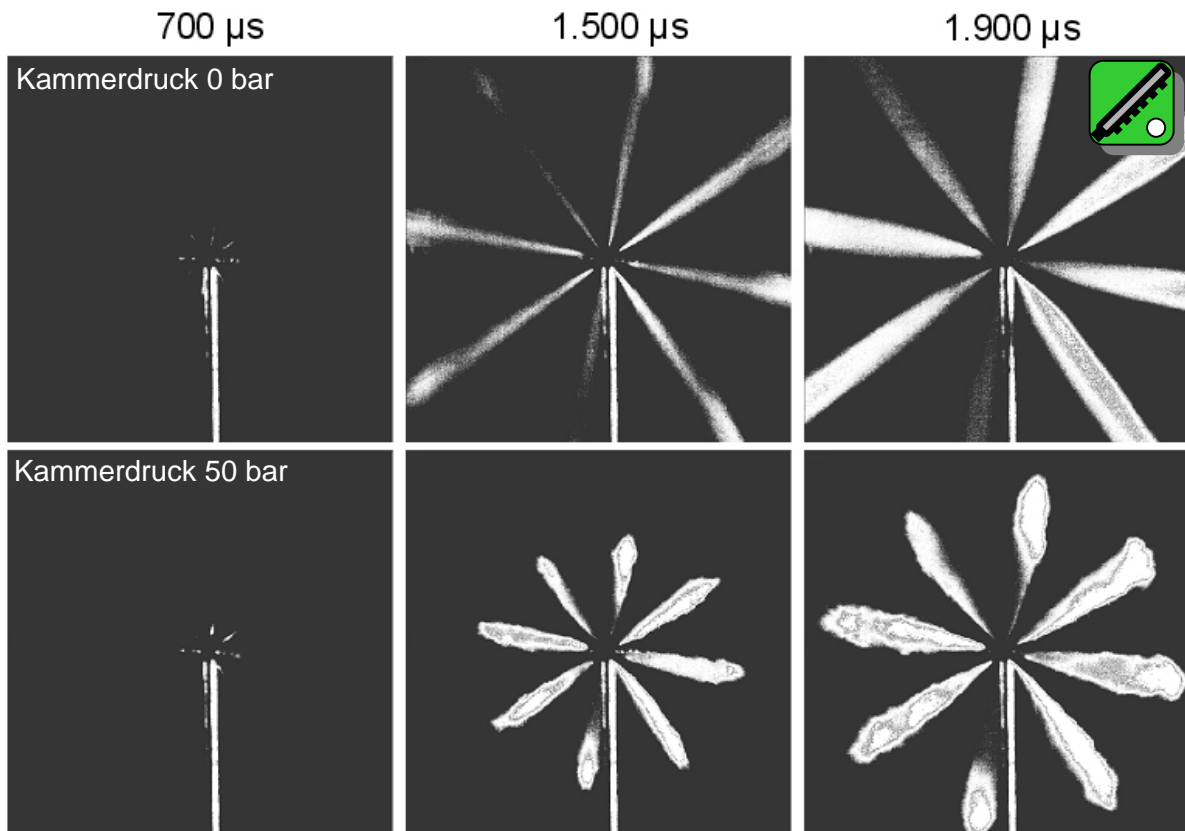


Abbildung 39: Kammerdruckvariation 0 (oben) und 50 bar (unten), Rapsöl 70 °C, 1.500 bar

Drehzahlbereichen weist das Strahlbild der Einspritzung von Rapsöl unzufrieden stellende Ergebnisse aus (vgl. Kap. 8.2 und 8.3), was durch den höheren Kompressionsdruck teilweise kompensiert wird.

## 8.6 Druckverlauf Hochdruckleitung

Die im Vergleich zu Dieselkraftstoff abweichenden physikalischen Eigenschaften von Rapsöl führen bei der Kompression eines gleichen Volumens zu höheren Enddrücken. Der Einspritzdruck wird bei einem Common-Rail System durch einen Drucksensor eingeregelt und überwacht, sodass bei diesem Einspritzsystem keine nennenswerten Druckerhöhungen durch den Gebrauch von Rapsöl zu befürchten sind. Wird als Einspritzsystem hingegen einnockengesteuertes System verwendet, ist jedoch von einer Erhöhung des Spitzendrucks auszugehen, da in den Pumpenelementen der Reiheneinspritzpumpe bei konstanter Füllmengeneinstellung auch ein konstantes Kraftstoffvolumen komprimiert wird. Um zu überprüfen, ob der Spitzendruck auf systemgefährdende Werte steigt, wurde im Laufe der Untersuchungen amnockengesteuerten System der Druckverlauf in der Hochdruckleitung analysiert (Kap. 6.4) und ausgewertet.

Die Auswirkungen auf den Einspritzspitzendruck durch den Wechsel des Kraftstoffs sind in Abbildung 40 dargestellt. In diesem Diagramm sind die Einspritzdrücke in der Hochdruckleitung für Diesel und Rapsöl über der Stellung der Nockenwelle der Reiheneinspritzpumpe aufgetragen.

In der Betrachtung des Verlaufs des Druckaufbaus ist die bereits bekannte Verlagerung des Einspritzbeginns und der Verzug der Strahlausbreitung nach dem Start des Einspritzvorgangs gut wieder zuerkennen.

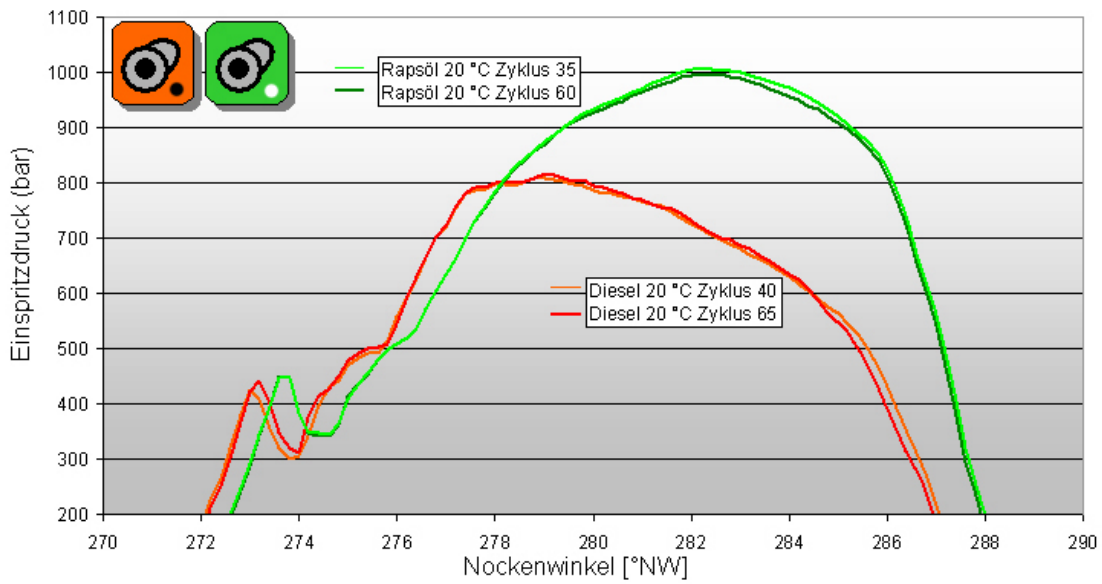


Abbildung 40: Nockengesteuertes System, Einspritzdruckverlauf Diesel - Rapsöl, 400 1/min

Die Analyse des Spitzendrucks ergibt folgendes Bild: Bei mittlerer Drehzahl (400 1/min) der Reiheneinspritzpumpe erhöht sich der Enddruck bei kaltem Rapsöl (20 °C) um etwa 200 bar auf 1.000 bar Einspritzdruck in der Hochdruckleitung. Auch bei Maximaldrehzahl steigt der Spitzendruck bei üblichen Umgebungstemperaturen (etwa 20 °C) nicht auf das Einspritzsystem gefährdende Werte

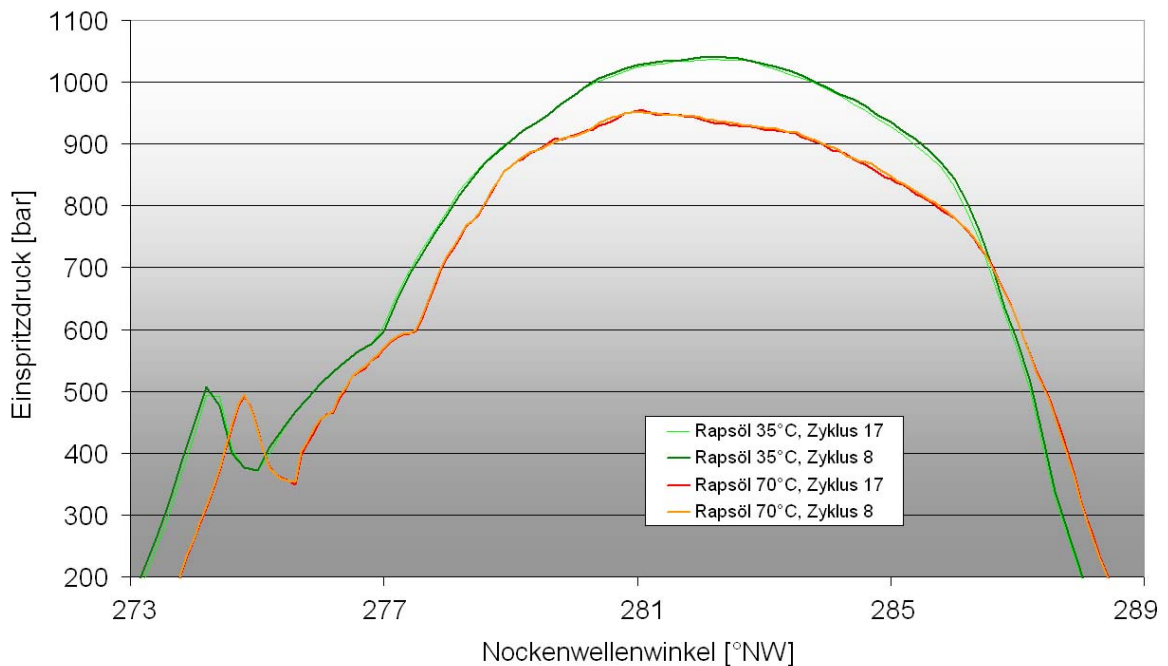


Abbildung 41: Nockengesteuertes System, Einspritzdruckverkauf Rapsöl 35 - 70 °C, 600 1/min

an. Eine Temperaturerhöhung des Rapsöls kann dem Effekt der Druckerhöhung entgegenwirken, wie in Abbildung belegt. Durch die Verdoppelung der Kraftstofftemperatur von 35 auf 70 °C kann der Spitzendruck um etwa 100 bar gesenkt werden.

Im Umkehrschluss ist allerdings zu beachten, dass die Abkühlung des Rapsöls den Einspritzdruck drastisch erhöhen kann. Bei Außentemperaturen unter den Gefrierpunkt und ohne Vorwärmung des Pflanzenöls sind schwere Schäden an der Einspritzanlage zu erwarten.

## 9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Biogene Kraftstoffe haben gegenüber fossilen Kraftstoffen den großen Vorteil eines geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislaufs. Reines Rapsöl ist eine Variante der Biokraftstoffe erster Generation, die zumindest einen Teil des Energiebedarfs im Verkehr decken kann und sich für Nischenlösungen in umweltsensiblen Anwendungen besonders anbietet. Die Anwendung von Reinem Rapsöl in Verbrennungsmotoren wird bereits seit einigen Jahren praktiziert. Die Verbrennung in diesen Motoren ist jedoch nicht voll zufrieden stellend, die Abgasemissionen sind oftmals erhöht und die Lebensdauer, bzw. die Zuverlässigkeit lassen noch Wünsche offen.

Eine wesentliche Ursache hierfür liegt in der nicht auf die Belange dieses Kraftstoffs abgestimmten Einspritztechnik. So wie Einspritzanlagen mit viel Aufwand für die optimale Verbrennung von Dieselkraftstoff entwickelt wurden, müssen auch die Grundlagen für eine optimale Gemischbildung mit Rapsöl zunächst gelegt werden. Hierzu liegt bisher fast keine Literatur vor.

Das in diesem Bericht beschriebene Forschungsprojekt stellt deshalb den ersten Teil eines Gesamtvorhabens dar, in dem moderne Diesel-Brennverfahren auf Pflanzenölkraftstoffe hinsichtlich eines zuverlässigen und schadstoffarmen Betriebs abgestimmt werden sollen. Im Rahmen der Arbeiten des ersten Projektschritts wurden zwei moderne Direkteinspritzsysteme (Common-Rail System undnockengesteuertes System) für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren hinsichtlich der Einspritzstrahlausbreitung bei Betrieb mit reinem Rapsöl untersucht.

Rapsöl weist bei niedrigen Temperaturen im Vergleich zu Dieselkraftstoff andere physikalische Eigenschaften auf, welche andere Anforderungen an die Einspritzanlage stellen, als dies bei Dieselkraftstoff der Fall ist. Nur wenn diese Anforderungen erfüllt werden, ist eine vollständige Verbrennung des Kraftstoffs im Motor sichergestellt und damit die Basis für schadstoffarmen, zuverlässigen und wirtschaftlichen Betrieb gelegt.

Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens sollte die Kraftstoffstrahlausbreitung außerhalb des Motors mit optischen Messverfahren analysiert werden. Hierzu wurde zunächst eine Kraftstoffversorgungseinheit aufgebaut, die eine Verwendung sowohl nockengesteuerter Einspritzsysteme, als auch modernster Common-Rail Systeme gemeinsam mit der optischen Messtechnik gestattet. Sie ist mit verschiedenen Pumpen und Heizsystemen ausgerüstet, um die Komponenten mit in den Versuch mit einzubeziehen, die auch in der Praxis in einem Fahrzeug verwendet werden. Der Aufbau des Hochdrucksystems stellt im Rahmen der hier präsentierten Arbeiten den Serienstand zweier ausgewählter Motoren aus der Praxis dar. Er ist aber ausdrücklich dafür vorgesehen, entsprechend den Anforderungen, die sich als Ergebnisse aus den Untersuchungen ergeben, modifiziert zu werden.

Die Einspritzung erfolgte in zwei verschiedene optisch zugängliche Kammern. Dies ist zum einen die Atmosphärenkammer, die durch einfach zu säubernde, große optische Zugänge, die Möglichkeit

bietet, rasch zu qualitativ aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen. Sie kann dafür nur unter Umgebungsdruck betrieben werden.

Die zusätzlich verfügbare Druckkammer stellt die Bedingungen zur Verfügung, wie sie im Brennraum des Dieselmotors im Moment der Einspritzung vorherrschen. Der Druck in der Kammer wurde in Stufen zwischen Umgebungsdruck und 50 bar gewählt, um verschiedene Lastzustände und Verdichtungsverhältnisse mit zu erfassen. Um in jedem Fall eine Zündung des eingespritzten Kraftstoffs zu verhindern, wird die Druckkammer mit Stickstoff gefüllt. Messungen an dieser Druckkammer sind wesentlich aufwendiger, dafür aber näher an den realen Bedingungen des Motors.

Zur Erfassung und Bewertung der Strahlausbreitung kamen die Mie-Streulichtmesstechnik und die Schattenrissmesstechnik zum Einsatz. Durch ein Glasfenster der Druckkammer wird helles Licht auf den bzw. die Einspritzstrahlen geworfen. Eine hochauflösende Kamera nimmt in einem Fall den vom Einspritzstrahl geworfenen Schatten, im anderen Fall das an am Einspritzstrahl rechtwinklig gestreute Licht auf und erzeugt ein Bild. Aus diesen Bildern lassen sich Aussagen zur Außenkontur der Flüssigphase und qualitative Aussagen zur inneren Beschaffenheit des Strahls treffen. Eine Beurteilung der Verdampfung ist mit den hier gewählten Verfahren nicht möglich.

Neben dem optischen Messaufbau gestattet der Versuchsaufbau auch Messungen des Einspritzdrucks und verschiedener Systemparameter, wie Drehzahl der Nockenwelle, Temperaturen oder Vordrücke, die für die korrekte Einstellung des Messpunktes erforderlich sind.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bestätigen einige in vielen Literaturquellen geäußerte Vermutungen.

Eine Einspritzanlage, die für Dieselmotorkraftstoff ausgelegt wurde, erzeugt bei der Verwendung von Rapsöl mit Raumtemperatur Einspritzstrahlen, die keine Grundlage einer guten Gemischbildung sein können. Die Einspritzstrahlen schnüren sich ein, d. h. sie werden dünner und länger im Vergleich zum Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. Die bei der Zerstäubung entstehenden Tröpfchen sind, ohne Tropfenspektalanalyse nur anhand des Nebels beurteilt, deutlich größer. Die Vermischung mit der Luft im Brennraum ist somit erschwert, die Vorbedingungen für eine vollständige und schadstoffarme Verbrennung sind schlecht. Dies wird sich besonders bei Teillast und Leerlauf zeigen, wo eine unterstützende Wirkung des heißen Brennraumes bei der Gemischbildung fehlt.

Neben diesen Gesichtspunkten der Verbrennung kommt die Wandbenetzung durch die zu langen Einspritzstrahlen hinzu. Die optischen Untersuchungen konnten eindeutig zeigen, dass die Einspritzstrahlen so lang werden, dass direkt die Wand berührt wird. Dieser Wandauftrag gelangt im Motorbetrieb zum großen Teil in den Triebwerksraum und verdünnt dort das Motorenöl mit den entsprechenden Folgen. Der Rest führt zur Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe oder bildet gemeinsam mit Ruß aus der Verbrennung Ablagerungen an empfindlichen Stellen des Brennraumes und an den Ladungswechselorganen.

Aus hydraulischer Sicht konnte weiterhin beobachtet werden, dass kaltes Rapsöl deutliche Verzögerungen des Einspritzbeginns im Vergleich zu Diesel aufweist. Diese Verzögerung ist von der

Drehzahl bzw. dem Einspritzdruck abhängig. Der Einspritzdruck steigt beim nockengesteuerten System gegenüber der Verwendung von Rapsöl an, erreicht aber mit Raumtemperatur noch keine kritischen Werte. Bei winterlichen Temperaturen ist aber auf jeden Fall Vorsicht geboten.

Eine Erwärmung des Rapsöls nähert die Viskosität und die Oberflächenspannung den Werten von Dieselmotoren an. Wie an vielen Stellen in der Praxis geschildert, konnte auch im hier vorliegenden Versuchsaufbau gezeigt werden, dass dies alle oben beschriebenen negativen Auswirkungen abmildert. Die Einspritzstrahlen werden kürzer und buschiger, das Tropfenspektrum mit menschlichem Auge betrachtet feiner, der Spitzendruck fällt und die Verzugszeit zwischen Ansteuerbeginn, bzw. Förderbeginn sinkt. Mit Rücksicht auf die einsetzende Polymerisation wurde die Erwärmung allerdings nicht über 70 °C betrieben. Die hierbei beobachteten Verbesserungen gegenüber Raumtemperatur waren deutlich, das Niveau der Einspritzung von Dieselmotoren wurde aber bei keinem der untersuchten Systeme erreicht.

Alle Aussagen treffen sowohl für das nockengesteuerte Einspritzsystem, als auch für das Common-Rail System zu.

Als wesentliches Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen bleibt festzuhalten, dass die Optimierung der Einspritzung nur aufgrund von Erwärmung des Rapsöls nicht ausreichend ist, um das hohe Niveau der Gemischbildung heute aktueller Brennverfahren zu erreichen. Für zukunftsweisende Arbeiten ist die Optimierung der Düsengeometrie und ggf. der gesamten Einspritzanlage erforderlich. Derartige Arbeiten werden am Institut für Kolbenmaschinen weiter verfolgt und sollen Gegenstand zukünftiger Veröffentlichungen und Berichte sein. Unter Umständen kann mit diesen Maßnahmen die derzeit übliche Erwärmung des Rapsöls reduziert oder sogar ganz darauf verzichtet werden.

Die bisher vorgenommenen Untersuchungen haben den Kraftstoffmassenstrom pro Einspritzvorgang nicht betrachtet. Für den Betrieb des Versuchsmotors ist dies eine sehr wichtige Größe, die zukünftig zu erfassen ist, denn nicht nur Strahlqualität und Einspritzdruck, sondern auch der Kraftstoffmassenstrom bzw. die Einspritzdauer haben einen großen Einfluss auf die Verbrennung.

Die nachfolgenden Untersuchungen müssen selbstverständlich intensiver an der Druckkammer durchgeführt werden. Hierbei gilt es auch noch zu untersuchen, wie weit ein höherer Kompressionsdruck als heute üblich, gleichbedeutend mit einem größeren Verdichtungsverhältnis des Motors, zielführend für Gemischbildung und Verbrennung ist. Hilfreich ist hierbei, dass parallel zu weiteren Experimenten an der Druckkammer demnächst Motorversuche am Forschungseinzylindermotor starten werden, die eine Verifikation der optischen Messungen unter den Bedingungen der realen Verbrennung ermöglichen und über die Abgasemissionsmessung eine eindeutige Bewertung der Änderungsmaßnahmen zulassen.

## 10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

TAbbildung 1: Aspekte für biogene Kraftstoffe.....	5
TAbbildung 2: Offener CO <sub>2</sub> -Kreislauf fossiler (links) und geschlossener CO <sub>2</sub> -Kreislauf biogener (rechts) Kraftstoffe.....	6
Abbildung 3: Chemischer Aufbau von Rapsöl.....	7
Abbildung 4: Herstellung von Rapsöl.....	8
Abbildung 5: Stoffeigenschaften von Rapsöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff [1] [3].....	8
Abbildung 6: Kinematische Viskosität von Dieselkraftstoff und Rapsöl.....	9
Abbildung 7: Siedelinie von Rapsöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff.....	10
Abbildung 8: Oberflächenspannung von Dieselkraftstoff und Rapsöl.....	10
Abbildung 9: Ablagerungen an Einspritzdüse, Einlassventil und Kolben.....	12
Abbildung 10: Einzylinder-Forschungsaggregat.....	16
Abbildung 11: Versuchsträger für den Praxisbetrieb, RS1 und Fährschiff.....	17
Abbildung 12: Schema der Kraftstoffversorgungseinheit.....	19
Abbildung 13: Bosch Injektor BR2000CR (hinten) Bosch Einspritzdüse DLLA 152P 1231 (vorne).....	19
Abbildung 14: 2-Tank-System.....	20
Abbildung 15: CAD-Planung und Realisierung der Kraftstoffversorgungseinheit.....	22
Abbildung 16: Atmosphärenkammer mit montierter Einspritzdüse und Kamera.....	22
Abbildung 17: Druckkammer mit Common-Rail Injektor, Beobachtungsscheibe ausgebaut.....	23
Abbildung 18: Versuchsaufbau Mie-Streulichtverfahren (links: Schema, rechts: Durchführung).....	24
Abbildung 19: Schattenrisstechnik, Schema (links) Versuch (rechts).....	25
Abbildung 20: Matrix der durchgeführten Untersuchungen.....	28
Abbildung 21: Bosch DLLA 152P 1231, ungleichmäßiges Einspritzbild.....	29
Abbildung 22: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel - Rapsöl bei 250 1/min und 20 °C (Streulichtaufnahme).....	30
Abbildung 23: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel - Rapsöl bei 1.250 1/min und 20 °C Kraftstofftemperatur (Schattenrissaufnahme).....	31
Abbildung 24: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel - Rapsöl, Verlängerung der Einspritzstrahlen (Streulichtaufnahme).....	32
Abbildung 25: Einspritzstrahl, Schema [15].....	33
Abbildung 26: Nockengesteuertes System, Vergleich Rapsöl bei verschiedenen Kraftstofftemperaturen (500 1/min, 1 °NW n. EB.).....	33
Abbildung 27: Nockengesteuertes System, Vergleich Rapsöl bei 20 (links) und 70 °C (rechts), 250 1/min (Streulichtaufnahme).....	34
Abbildung 28: Nockengesteuertes System, Vergleich Diesel bei 20 °C und Rapsöl bei 20 und 70 °C, 1.250 1/min (Schattenrissaufnahme).....	35
Abbildung 29: Elektrode in der Druckkammer.....	36
Abbildung 30: Common-Rail System, Vergleich Diesel - Rapsöl, 750 bar, 20 °C, 50 bar Kammerdruck (Streulichtaufnahme).....	37
Abbildung 31: Common-Rail System, Vergleich Diesel - Rapsöl, 1.500 bar, 20 °C (Streulichtaufnahme).....	38
Abbildung 32: Common-Rail System, Vergleich Rapsöl, 1.500 bar, 20 (links) und 70 °C (rechts) (Streulichtaufnahme).....	39
Abbildung 33: Nockengesteuertes System, Rapsöl bei Drehzahl von 250 (links), 750 (Mitte) und 1.250 1/min (rechts), 50 °C (Streulichtaufnahme).....	42
Abbildung 34: Common-Rail System, Vergleich Rapsöl bei 750 (links), 1.000 (Mitte) und 1.500 bar (rechts) (Streulichtaufnahme).....	43
Abbildung 35: Common-Rail System, Vergleich Rapsöl, 750 (links), 1.000 (Mitte) und 1.500 bar (rechts), 50 °C (Streulichtaufnahme).....	44
Abbildung 36: Strahlbild kurz vor Ende Einspritzvorgang, Rapsöl bei 750 und 1.500 bar, Diesel bei 1.500 bar.....	45
Abbildung 37: Common-Rail System, Rapsöl bei 1.500 bar, 70 °C und 2.000 (oben) bzw. 3.000 µ (unten) Bestromungszeit.....	46
Abbildung 38: Kammerdruckvariation 0 (oben) und 50 bar (unten), Rapsöl 20 °C, 750 bar.....	47
Abbildung 39: Kammerdruckvariation 0 (oben) und 50 bar (unten), Rapsöl 70 °C, 1.500 bar.....	48
Abbildung 40: Nockengesteuertes System, Einspritzdruckverlauf Diesel - Rapsöl, 400 1/min.....	49
Abbildung 41: Nockengesteuertes System, Einspritzdruckverlauf Rapsöl 35 - 70 °C, 600 1/min.....	49

## 11 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE FNR (Hrsg.): Biokraftstoffe – eine vergleichende Analyse. Gülzow : FNR, 2006
- [2] Vornorm DIN 51605 Juni 2005. Kraftstoffe für pflanzenölaugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen
- [3] TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (Hrsg.): Rapsölkraftstoff in Traktoren und Blockheizkraftwerken. Tagungsband zum Internationalen Expertenforum Februar 2002 in Straubing. Aachen : Shaker-Verl., 2003
- [4] Verordnung über Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung brennbarer Flüssigkeiten zu Lande - Verordnung über brennbare Flüssigkeiten VbF. Fassung vom 13. Dezember 1996
- [5] HOPP, MARTIN: Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor. Rostock, Universität Rostock, Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik, Diss., 2005
- [6] BIRKNER, CHRISTIAN: Untersuchung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Vorstellung eines neuen Pflanzenöl-Motor-Konzeptes. Kaiserslautern, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenwesen, Diss., 1995
- [7] RICHTER, HERWIG: Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren, BMFT-Abschlussbericht TV 88837, Weissach , 1991
- [8] JURISCH C.; MEYER-PITTRUFF, R.: Pflanzenölgereignete Dieselmotoren deutscher Hersteller. VDI Berichte, Nr. 116, 1994
- [9] REMMELE, EDGAR; WIDMANN, BERNHARD: Positionspapier Rapsölkraftstoff. Straubing, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe, 2004
- [10] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE FNR (Hrsg.): Das 100-Traktoren-Demonstrationsprojekt des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL). 2. Statuskolloquium in Braunschweig. Gülzow : FNR, 2004
- [11] THUNKE, KLAUS; ROCKTÄSCHEL, ANJA; REMMELE, EDGAR: Wechselwirkung zwischen Rapsölkraftstoff und dem Motoröl. Landtechnik 58 (2003), Nr. 5, S. 310-311
- [12] WAGNER, UWE; MERKEL, SASCHA; VELJI, AMIN; SPICHER, ULRICH: Experimental Investigations of a Soot-free Combustion Process in Direct Injection Diesel Engines. Diesel Engine 2006, Ecole Centrale de Lyon, May 31& June 1, 2006
- [13] MERKEL, SASCHA; ECKERT, PETER, WAGNER, UWE; VELJI, AMIN; SPICHER, ULRICH: Eine neue Einspritzstrategie zur besseren Luftausnutzung bei Dieselmotoren mit Direkteinspritzung. Tagung Motorische Verbrennung, Haus der Technik, München, März 2007
- [14] KOHSE-HÖNIGHAUS, KATHARINA; JEFFRIES, JAY B.: Applied Combustion Diagnostics. New York : Taylor&Francis, 2002



- 
- [15] SPICHER, ULRICH: Skript zur Vorlesung Verbrennungsmotoren. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Institut für Kolbenmaschinen, 2004
- [16] SPESSERT, BRUNO M.; SCHLEICHER, ANDREAS: Einfluss von Biokraftstoffen auf die Abgas- und Geräuschemission kleiner Industriedieselmotoren. In: MTZ 03-2007, Jahrgang 68

## 12 INDEX

	<b>2</b>		Einspritzverhalten	27
2-Tank-System		20	Einspritzverzug	33, 38, 41, 44, 46
	<b>A</b>		Einspritzbeginn	30
Abgasturbolader		16	Einzyylinder Forschungsmotor	16
Atmosphärenkammer		15, 22, 46	Erdöl	<i>Siehe</i> Dieselkraftstoff
	<b>B</b>			<b>F</b>
Bestromungsdauer		37, 43, 45	Filter	21
Binnenseefährschiff		17	Flammpunkt	9
Bioethanol		6, 7	Forschungsvorhaben	15
Biogas		6	fossile Kraftstoffe	5
Biomasse		6		<b>G</b>
Biowasserstoff		7	Gemischbildung	12, 16
Blitzlampe		24	Gesetzgeber	5
Bosch BR2000CR		18, 23	Glycerin	7
Bosch DLLA 152P 1231		19, 29		<b>H</b>
	<b>C</b>		Heavy-Duty Dieselmotor	11, 29, 37
CCD-Kamera		23, 24	Heizung	18
CO <sub>2</sub> -Kreislauf		6	Hochdruckleitung	21, 48
Common-Rail	<i>Siehe</i> Einspritzsystem		Druckverlauf	48
Common-Rail Pumpe		18	Hochdruckpumpe	18
	<b>D</b>		Hohenzollerische Landesbahn	17
Datenverarbeitung		26		<b>K</b>
Dieselmotor			Kammerdruck	27, 46
Direkteinspritzung		12	Kohlenwasserstoffverbindungen	6
Kammermotoren		12	Kompressibilität	25
Verkokungen		12	Kraftstofftemperatur	21, 27, 33
DIN 51605		8, 11	Erwärmung	39, 45
Doppelbindungen		7	Temperaturmessung	26
Drehzahl		40, 41	Variation	28
Druckkammer		15, 22, 27, 36, 46	Kraftstoffversorgungseinheit	18, 19
	<b>E</b>			<b>M</b>
Eindringtiefe		25	MAN D2866	17, 18, 29, 40
Einschnürung		32, 39, 41, 47	Messprogramm	27
Einspritzdauer		45	Mie, Gustav	24
Einspritzdruck		25, 42, 47	Motoröl	13
Druckvariation		43	-verdünnung	32
Erhöhung		45		<b>O</b>
Einspritzstrahl			Oberflächenspannung	33
Keulenform		32	Optische Untersuchung	15, 23, 29
Einspritzsystem		28, 40	Detektion Spritzbeginn	41
Common-Rail		13, 18, 27, 36	Oxidation	6
nockengesteuertes		12, 17, 27, 29		<b>P</b>
			Pflanzenöl	6, 8

