



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

Diplomarbeit

**Zündwilligkeitsbestimmung (Cetanzahl) von Kraftstoffen mit dem
CFR- und dem BASF-Prüfverfahren und Analyse der Ergebnisse**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom- Ingenieurs unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer

und

Dipl. Ing. Dr. techn. Josef Graf

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Manuel Rohner

e01226903

DIPLOMAUFGABE

Herrn **Manuel ROHNER**, Matr. Nr.: 01226903, Kennzahl 066.482, wird folgende
Diplomaufgabe gestellt:

„Zündwilligkeitsbestimmung (Cetanzahl) von Kraftstoffen mit dem CFR- und dem BASF-Prüfverfahren und Analyse der Ergebnisse“

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

1. Theoretische Analyse der Prüfverfahren: Es sollen die Unterschiede zwischen beiden Prüfmotoren (CFR und BASF) hinsichtlich Brennverfahren, den vorgegebenen Betriebsbedingungen, der Bewertung der Zündwilligkeit und mögliche Differenzen des Messergebnisses zwischen beiden Verfahren wissenschaftlich betrachtet und analysiert werden.
2. Adaption und Inbetriebnahme des BASF-Prüfmotors mit Zylinderdruckindizierung und der benötigten Messtechnik.
3. Untersuchung an den Prüfmotoren:
 - **Kalibrierung und Basisvermessung:** Die Cetanzahl-Bestimmung eines CEC- und B0-Dieselmotorkraftstoffes ist am BASF- und am CFR-Prüfmotor durchzuführen.
 - **Vergleichsmessungen am BASF- und CFR-Prüfmotor:** Es sollen Mischungen mit 5 unterschiedlichen FAME-Kraftstoffen sowie unterschiedliche Anteile von Zündbeschleuniger im Dieselmotorkraftstoff mehrmals geprüft und die Ergebnisse der Cetanzahl – Bestimmung hinsichtlich Differenzen und Wiederholbarkeit ausgewertet werden.
 - **Einfluss von „Betriebsstörungen“ auf das Messergebnis:** Bedienfehler oder falsche Betriebsparameter beeinflussen das Messergebnis. Wie sich diese auf

den Messwert bzw. die Präzision auswirken, soll anhand einer Parametervariation geklärt werden.

- **Verbrennungsanalyse mittels Zylinderdruckindizierung:** Durch moderne Motormesstechnik soll das Zündverhalten im Brennraum der beiden Prüfmotoren bewertet und mögliche Ursachen für unterschiedliche Messwerte hergeleitet werden.

4. Die Auswertung der Untersuchungen und die Ergebnisanalyse soll den Unterschied zwischen dem BASF- und dem CFR-Prüfverfahren aufzeigen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollen mögliche Änderungsvorschläge für Betriebsparameter beim BASF-Verfahren dargestellt werden, um Unterschiede bei der Cetanzahl-Bestimmung beider Prüfmotoren zu minimieren.

Ein gebundenes Exemplar, das ungebundene Original und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Die Diplomarbeit soll Anfang Jänner 2019 beginnen und ist bis Ende August 2019 zu beenden.

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

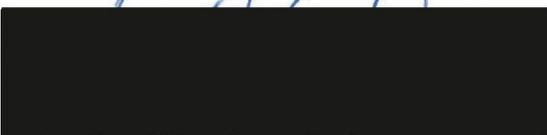
Die Benutzung der Versuchseinrichtungen des Institutes hat in den Dienststunden und unter Anleitung des Betreuers zu erfolgen. Dabei dürfen alle Arbeiten nur unter besonderer Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften durchgeführt werden.

Einverstanden:



Manuel Rohner

Betreuer am Institut:



Dr. Josef Graf



Prof. Dr. Bernhard Geringer

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Zündwilligkeitsbestimmung (Cetanzahl) von Kraftstoffen mit dem CFR- und dem BASF-Prüfverfahren und Analyse der Ergebnisse

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

10.10.2019

Datum



Unterschrift

Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte ohne die vorherige Einverständniserklärung des Institutes für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik nicht gestattet.

Kurzfassung

Eines der wesentlichen Qualitätskriterien für die Bewertung von Dieselmotoren stellt die Zündwilligkeit der Kraftstoffe, welche über die Cetanzahl definiert wird, dar. Weltweiter Standard für deren Ermittlung ist der CFR-Motor. Auf europäischer Ebene wird häufig auch der kompakter gebaute BASF-Motor eingesetzt, welcher sich als gute Alternative zum CFR-Motor etablierte. Beide Motoren unterliegen für die Bestimmung der Zündwilligkeit jeweiligen DIN-Normen, in denen die Vorgangsweisen und Vorschriften festgehalten sind.

Anhand vorangegangener Messungen konnte allerdings festgestellt werden, dass die Messergebnisse zwischen CFR- und BASF-Motor zum Teil deutliche Abweichungen bei biogenen Kraftstoffen, wie FAME (Fatty Acid Methyl Ester) zeigten, wobei der BASF die Cetanzahl zumeist höher bewertet. Auch der Einsatz von Zündbeschleunigern führt zu Differenzen zwischen den beiden Motoren.

Eine genaue Analyse der Konstruktionsmerkmale der beiden Prüfmotoren und Vergleichsmessungen an beiden Motoren mit unterschiedlichen FAME-Kraftstoffen, sowie Kraftstoffe, die mit Zündbeschleunigern versetzt wurden, sollen die Unterschiede aufdecken. Anhand der Vermessung der Kraftstoffmischungen aus B0 und FAME sowie Zündbeschleunigern konnten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Messungen der reinen FAME-Kraftstoffe zeigten hingegen eine Abweichung der Cetanzahl zwischen den beiden Prüfverfahren von bis zu 4,6 Cetanzahlen, je nach Kraftstoff.

Mithilfe der gemessenen Parameter, insbesondere der Verbrennungsanalyse, konnte festgestellt werden, dass die Parameter im Brennraum deutliche Unterschiede aufweisen. Neben dem Druck, der bedingt durch das Messprinzip, aufgrund der Androsselung am BASF geringer ausfällt, zeigen sich in der Brennraumtemperatur Differenzen von bis zu 150 °C, wobei der BASF-Motor die höheren Temperaturen aufweist. Diese Differenzen können mithilfe des höheren Verdichtungsverhältnisses am BASF-Motor erklärt werden.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollten im weiteren Verlauf durch diverse Parametervariationen Maßnahmen vorgeschlagen werden, um die ermittelten Cetanzahlen der FAME-Kraftstoffe am BASF-Motor an die Ergebnisse des CFR anzugleichen. Die Ergebnisse fossiler Kraftstoffe, die zwischen den beiden Motoren gut korrelieren, dürfen dadurch nicht beeinträchtigt werden. Um ähnliche Bedingungen in den Brennräumen zu erlangen, sollte die Temperatur im Brennraum entweder durch ein geringeres Verdichtungsverhältnis oder eine Ansaugluftkonditionierung reduziert werden. Eine zusätzliche Entdrosselung des BASF-Motors führt zu einer Reduzierung der Druckdifferenzen zwischen den beiden Motoren.

Abstract

One of the essential quality criteria for the evaluation of diesel fuels is the ignitability, which is defined by the cetane number. In this regard, worldwide the CFR engine acts as a benchmark to which other engines are compared. At European level, the more compact BASF engine, has established itself as a good alternative to the CFR engine. The DIN standards details the relevant procedures and regulations for determining the ignitability of both engines.

Previous testing between the CFR and BASF engine has shown that in some cases there are significant differences in biogenic fuels such as FAME (Fatty Acid Methyl Ester), however the BASF generally has a higher Cetane number. The use of ignition accelerators also leads to differences between the two engines.

A detailed analysis of the design features of the two test engines and comparative measurements on both engines with different FAME fuels and fuels mixed with ignition accelerators should show the differences. Based on the measurement of the fuel mixtures of B0 and FAME as well as ignition accelerators, no significant differences could be determined. Measurements of pure FAME fuels, on the other hand, showed a deviation of the cetane number between the two test methods up to 4.6 cetane numbers, depending on the fuel.

With the aid of the measured parameters, in particular the combustion analysis, it was possible to establish that the parameters in the combustion chamber show significant differences. In addition to the pressure, which is lower due to the measuring principle caused by the throttling at the BASF, there are differences up to 150 °C in the combustion chamber temperature, whereby the BASF engine has the higher temperatures. These differences can be explained by the higher compression ratio on the BASF engine.

On the basis of the gained knowledge, measures should be proposed in the further course through various parameter variations in order to adapt the determined cetane numbers of the FAME fuels at the BASF engine to the results of the CFR. The results of fossil fuels, which correlate well between the two engines, must not be affected. In order to achieve similar conditions in the combustion chambers, the temperature should be reduced either by a lower compression ratio or by intake air conditioning. Additional dethrottling the BASF engine will reduce the differences in pressure between the engines.

Abkürzungsverzeichnis

°KW	Grad Kurbelwinkel	HC	Kohlenwasserstoffe
°KWnOT	Grad Kurbelwinkel nach oberem Totpunkt	I.M.U	Institut für Mineralölprodukte und Umweltanalytik
°KWvOT	Grad Kurbelwinkel vor oberem Totpunkt	IDI	Kammermotoren (indirect injection)
°KWvZOT	Grad Kurbelwinkel vor oberem Zündtotpunkt	IFA	Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
Abb.	Abbildung	ISO	International Organization for Standardization
AFIDA.....	Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer	LLK.....	Ladeluftkühlung
AI 5 [°KW].....	5 % Energieumsatz	LM [%]	Luftmenge
AI 10 [°KW].....	10 % Energieumsatz	Mio.	Millionen
AI 50 [°KW].....	50 % Energieumsatz	mmWS.....	Millimeter Wassersäule
AI 90 [°KW].....	90 % Energieumsatz	MWM.....	Motoren-Werke-Mannheim
AI 95 [°KW].....	95 % Energieumsatz	NHG	Nadelhubgeber
AMN	Alpha- Methylnaphthalin	Nkw	Nutzkraftwagen
ASG.....	Analytik-Service Gesellschaft mbH	NO _x	Stickoxide
ASTM	American Society for Testing and Materials	NTC	negativer Temperaturkoeffizient
AVL	Anstalt für Verbrennungskraft-Maschinen List	O	Sauerstoff
B0	Dieselmotoren mit 0 % Biodiesel	OT	oberer Totpunkt
B7	Dieselmotoren mit 7 % Biodiesel	PAK.....	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
B10	Dieselmotoren mit 10 % Biodiesel	Pkw	Personenkraftfahrzeug
B30	Dieselmotoren mit 30 % Biodiesel	ppm	parts per million
B50	Dieselmotoren mit 50 % Biodiesel	PRK.....	Primäre Referenzkraftstoffe
B100	reiner Biodiesel	r.L. [%].....	relative Luftfeuchte
BASF	Badische Anilin- und Soda-Fabrik	RME	Rapsmethylester
BTDC.....	vor oberem Totpunkt bzw.	S	Schwefel
	beziehungsweise	SB	Sommerblend
C	Kohlenstoff	SME.....	Sojamethylester
CEC.....	Coordinating European Council	Tab.	Tabelle
CFR..	Cooperative Fuel Research Committee	TDC	oberer Totpunkt (top dead center)
CI.....	compression ignition	THG.....	Treibhausgase
CI [-]	Cetanzahl	TU	Technische Universität
CN [-]	Cetane number (Cetanzahl)	UCOME	used cooking oil methyl ester
COV [%].....	Variationskoeffizient	UT	unterer Totpunkt
CZ [-]	Cetanzahl	VB	Verbrennungsbeginn
d. h.	das heißt	VG	Verbrennungsgeber
DI	Direkteinspritzer (direct ignition)	vgl.....	Vergleiche
DIN	Deutsches Institut für Normung	WB	Winterblend
DPF	Dieselpartikelfilter	z.B.	zum Beispiel
EB.....	Einspritzbeginn	ZV [°KW]	Zündverzögerung
EN	Europäische Norm		
EU	Europäische Union		
FAME	fatty acid methyl ester		
FIT	Fuel ignition tester		
H	Wasserstoff		

Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
c_V	Spezifische Wärmekapazität	J/kgK
D	Bohrungsdurchmesser	mm
dQ	Differentieller Heizverlauf	$J/°KW$
EB	Einspritzbeginn	$°KWvOT$
H	Handradstellung	–
l	Pleuellänge	mm
LM	Luftmenge	%
L_{St}	Stöchiometrischer Luftbedarf	–
m	Masse	kg
m_K	Kraftstoffmasse	kg
m_L	Luftmasse	kg
$m_{L,St}$	Stöchiometrische Luftmasse	kg
n	Drehzahl	min^{-1}
p	Zylinderdruck	bar
$p_{Dü}$	Düseneinspritzdruck	bar
p_{Leit}	Leitungsdruck	bar
p_{mi}	Indizierter Mitteldruck	bar
p_{Saug}	Saugrohrdruck	bar
$p_{Um,g}$	Umgebungsdruck	bar
R	Gaskonstante	J/kgK
R^2	Bestimmungsmaß	–
s	Hub	mm
S	Schränkung	mm
T	Zylindertemperatur	K
T_{Abg}	Abgastemperatur	K
$T_{Öl}$	Öltemperatur	$K, °C, °F$
T_{Saug}	Ansauglufttemperatur	$K, °C$
$T_{Um,g}$	Umgebungstemperatur	$K, °C$
$V(\varphi)$	Zylindervolumen	mm^3
v_B	Einspritzmenge	μl
\dot{v}_B	Kraftstoffdurchsatz	ml/min
V_H	Hubvolumen	mm^3
W_i	Indizierte Arbeit	J
$x(\varphi)$	Kolbenweg	mm
ZV	Zündverzug	$°KW, ms$
Δ	Deachsierung	mm
ε	Verdichtungsverhältnis	–
$\vartheta_{Ansaugluft}$	Ansauglufttemperatur	$°C$
$\vartheta_{DüKü}$	Temperatur Düsenkühlung	$°C$
ϑ_{Km}	Kühlmitteltemperatur	$°C$
ϑ_{Kst}	Kraftstofftemperatur	$°C$
κ	Isentropenexponent	–
λ	Luftverhältnis	–
φ	Kurbelwinkel	deg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen.....	3
2.1	Grundlagen der dieselmotorischen Verbrennung	3
2.2	Gemischbildung und Verbrennung	4
2.2.1	Vorkammer	6
2.2.2	Wirbelkammer.....	6
2.2.3	Direkteinspritzer	7
2.3	Kenngößen innermotorischer Verbrennung	8
2.3.1	Mitteldruck.....	8
2.3.2	Luft-Kraftstoff-Verhältnis	9
2.3.3	Heizverlauf	10
2.3.4	Umsatzpunkte	11
2.3.5	Zündverzug	12
2.4	Kraftstoffe	15
2.4.1	Diesekraftstoffe	17
2.4.2	FAME (Fatty Acid Methyl Ester).....	18
2.5	Zündwilligkeit und Prüfverfahren	20
2.5.1	Cetanzahl.....	21
2.5.2	Referenzkraftstoffe.....	21
2.5.3	Cetanindex.....	23
2.5.4	CFR-Prüfmotor.....	24
2.5.5	BASF-Prüfmotor	27
2.5.6	FIT-Fuel Ignition Tester.....	30
3	Prüfstandsaufbau und Sensorik	31
3.1	CFR-Prüfmotor	31
3.2	BASF-Prüfmotor.....	32
3.3	Verwendete Software	35
3.4	Kraftstoffe	35
4	Messungen und Messergebnisse	38

4.1	Messablauf	38
4.2	Ergebnisse Cetanzahlen	38
4.2.1	FAME 7%	38
4.2.2	FAME 30%	40
4.2.3	FAME Reinstoffe	42
4.2.4	Alterung	45
4.2.5	Zündbeschleuniger	46
4.3	Ansauglufttemperaturverlauf	49
4.4	Mögliche Messfehler und Messungenauigkeiten	51
4.5	Einspritzstrahl und Spraybild	53
4.6	Verbrennungsanalyse	58
4.7	Parametervariation	74
4.7.1	Variation der Einspritzmenge	75
4.7.2	Variation des Einspritzzeitpunktes	78
4.7.3	Variation des Einspritzdruckes	80
4.7.4	Variation der Ansauglufttemperatur	82
4.7.5	Androsselung des CFR-Motors	87
5	Diskussion	91
6	Zusammenfassung	94
	Literaturverzeichnis	97
	Abbildungsverzeichnis	102
	Anhang	A1

1 Einleitung

Dieselmotoren stellten nach Ottomotoren in Österreich im ersten Halbjahr 2019 die zweithäufigste Energiequelle an Neuzulassungen bei Pkw dar [1]. Abb. 1-1 zeigt auf, dass trotz der Dieselkrise im Jahre 2015 noch mehr als 50 % der in Österreich zugelassenen Fahrzeuge mit einem Dieselmotor ausgerüstet sind. In den letzten Jahren ist ein Rückgang an Neuzulassungen von dieselbetriebenen Fahrzeugen zugunsten von Otto-, Hybrid- und Elektroantrieben zu verzeichnen, was sich allerdings auf den bestehenden Fahrzeugbestand kaum auswirkt. Daraus resultiert, dass der Dieselantrieb im Jahre 2018 noch immer die Antriebslösung mit dem höchsten Marktanteil darstellt [1].

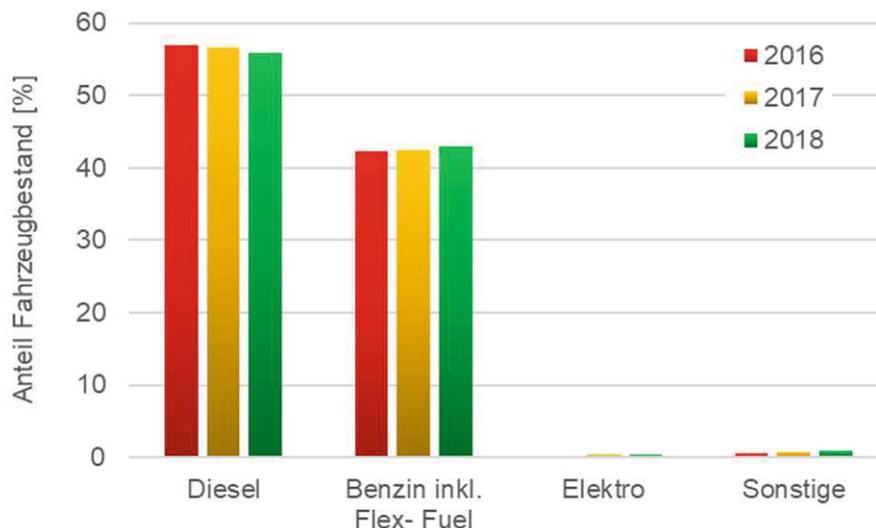


Abb. 1-1: PKW Fahrzeugbestand in Österreich von 2016 – 2018 [1]

Dieselmotoren zeichnen sich durch eine sogenannte Selbstzündung aus, was bedeutet, dass der Kraftstoff in die heiße komprimierte Luft eingespritzt wird und ohne externe Zündquelle selbstständig zu brennen beginnt (engl.: compression ignition, CI). Die Zeit zwischen der Einspritzung und der Verbrennung wird als Zündverzug in Grad Kurbelwinkel bzw. Millisekunden bezeichnet, deren Maß die Cetanzahl darstellt. Je geringer die Zündverzugszeit, desto besser die Zündwilligkeit eines Kraftstoffes und definitionsgemäß höher die Cetanzahl.

Für die Bestimmung der Cetanzahl, welche als ein Qualitätskriterium für Dieselmotoren gilt, können zwei genormte Verfahren herangezogen werden. Der CFR-Motor stellt dabei den weltweiten Standard dar, während im deutschsprachigen Raum auch der BASF-Motor weite Verbreitung findet. In der Vergangenheit zeigte sich, dass der BASF-Motor, insbesondere bei sehr zündwilligen Kraftstoffen, wie FAME

(Fatty Acid Methyl Ester), oder mit Zündbeschleunigern versetzte Kraftstoffe, höher bewertete [2].

Die Cetanzahl hat einen nicht unbeträchtlichen Einfluss auf das Startverhalten, den Wirkungsgrad, das Verbrennungsgeräusch sowie die gesetzlich geregelten Schadstoffemissionen. Somit stellt die Zündwilligkeit eines Kraftstoffes für die Auslegung von modernen Dieselmotoren ein wichtiges Kriterium dar.

Eine Erschöpfung der fossilen Primärquellen durch den enormen Energieverbrauch (in der EU 195 Mio. t (2013) wird mittel- bis langfristig eintreten. Dies, sowie Problematik von Treibhausgasen (THG), insbesondere CO₂ erfordert ein Umdenken zu alternativen Energien. Eine Möglichkeit stellen dabei FAME dar, die einige Vorteile, wie eine zum Teil hohe Zündwilligkeit oder höhere Schmierfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Dieselmotoren, aufweisen. Neuere Studien kommen zu dem Ergebnis, dass beispielsweise für Biodiesel aus Raps ein Treibhausgasminimierungspotential von über 50 % erreicht werden kann [3]. Aufgrund dessen ist es umso wichtiger, dass die Qualität, angegeben durch die Cetanzahlen für idente Kraftstoffe, dieselbe Bewertung erhält. Entsprechend DIN EN 590 liegt das Minimum für die Cetanzahl bei 51 CZ für einen Dieselmotorenkraftstoff, wobei der maximale FAME-Anteil auf 7 % beschränkt ist [4].

Die Arbeit verfolgt zwei Ziele. Zum einen sollen die beiden für die Bestimmung der Cetanzahl verwendeten Motoren durch Messungen und Analysen verschiedener biogener Kraftstoffe, sowie mit Zündbeschleuniger versetzte fossile Kraftstoffe gegenübergestellt werden, deren Vor- und Nachteile ermittelt und mögliche Abweichungen, sowie deren Ursachen analysiert werden. Zum Schluss sollen mögliche Anpassungen am BASF-Motor identifiziert und untersucht werden, die es ermöglichen, die Ergebnisse in jenen Bereichen deutlicher Abweichungen der Cetanzahl vergleichbar zu halten.

2 Theoretische Grundlagen

Ein Merkmal von Verbrennungsmotoren ist die innere Verbrennung, d. h. Energie wird in chemisch gespeicherter Form als Kraftstoff zugeführt und innerhalb des Motors durch Verbrennung in Wärme umgesetzt. Mittels dieser Energie in Form von Wärme wird am Kolben Arbeit verrichtet. Vom Kraftstoff zur mechanischen Arbeit liegen also zwei Energiewandlungen vor [5].

2.1 Grundlagen der dieselmotorischen Verbrennung

Bei einem Dieselmotor handelt es sich um eine Verbrennungskraftmaschine mit einer inneren, heterogenen Gemischbildung, was bedeutet, dass im Brennraum kein homogenes Luft- Kraftstoff- Gemisch vorherrscht. Durch die Einspritzung des Kraftstoffes in die komprimierte heiße Luft kurz vor dem oberen Totpunkt des Zylinders spricht man von einer inneren Gemischbildung, im Vergleich zu einer äußeren Gemischbildung z.B. durch einen Vergaser [6]. Darauf muss besonderes Augenmerk gelegt werden, da nur eine sehr begrenzte Zeit zur Verfügung steht. Eine weitere Besonderheit beim Dieselmotor stellt die Verbrennung durch die Diffusionsflamme dar [3].

Die Leistungsregelung erfolgt rein über die Menge des eingespritzten Kraftstoffes (Qualitätsregelung). Das Mischungsverhältnis aus Kraftstoff und Luft ändert sich kontinuierlich, während die Masse des Arbeitsfluides nahezu konstant bleibt [7].

Bei heutigen Dieselmotoren handelt es sich bis auf wenige Ausnahmen um Viertaktmotoren mit direkter Einspritzung, wobei sich die grundsätzliche Arbeitsweise nicht zu indirekt einspritzenden Motoren unterscheidet.

Die vier Takte des Kolbenmotors sind:

1) **Ansaugen**

Im ersten Arbeitstakt werden ausgehend vom OT (Oberen Totpunkt) in dieser Arbeit bei -360°KW die Einlassventile geöffnet. Durch die Abwärtsbewegung des Kolbens vergrößert sich das Volumen innerhalb des Zylinders, wodurch die Frischluft angesaugt wird.

2) **Verdichten**

Nach Erreichen des UT (unteren Totpunktes) werden die Ventile wieder geschlossen und der sich nach oben bewegende Kolben verdichtet entsprechend dem Verdichtungsverhältnis die Frischladung. Durch die Kompression im Zylinder steigen sowohl die Temperatur als auch der Druck im Zylinder stark an. Dabei können bei Dieselmotoren mit entsprechend hohem Verdichtungsverhältnis Temperaturen von bis zu 900°C [8] im Brennraum entstehen.

Noch vor Erreichen des OT im zweiten Takt, wird der Kraftstoff direkt (Direkteinspritzer) oder indirekt (Kammermotoren) in den Brennraum eingespritzt.

3) **Arbeiten**

Nach Verstreichen des Zündverzuges (Kapitel 2.3.5) beginnt die eigentliche Verbrennung im Bereich des Zünd-OT. Aufgrund des, durch die Verbrennung hervorgerufenen Druckanstieges, wird der Kolben wieder nach unten gedrückt und gibt dadurch mechanische Energie über die Kurbelwelle ab.

4) **Ausstoßen**

Im vierten und letzten Takt werden die Auslassventile geöffnet und die Abgase ausgeschoben. Einen Teil der Ausschiebearbeit übernimmt somit das Arbeitsgas im Zylinder aufgrund des vorhandenen Restdruckes, während der Kolben durch die Aufwärtsbewegung die restlichen Abgase ausschleibt. Sowohl die Einlass- als auch die Auslassventile öffnen vor und schließen nach den jeweiligen Totpunkten. Das Öffnen der Auslassventile vor Erreichen des UT führt zwar zu Verlusten bei der Expansionsarbeit, aber auch zu einer Verringerung der Ausschiebearbeit [9]. Mit zunehmender Ventilüberschneidung, also jene Zeit in der sowohl die Einlass- und Auslassventile geöffnet sind, steigen die Spülverluste an und der effektive Wirkungsgrad nimmt ab.

Durch das späte Einspritzen des Kraftstoffes sind höhere Kompressionen als bei Ottomotoren (Klopfgefahr) möglich. Für Berechnungen von Dieselmotoren wird häufig das Modell der Gleichdruckverbrennung herangezogen, welches thermodynamisch ungünstiger ist als das Gleichraumverfahren, welches für Ottomotoren angewandt wird. Der Grund dafür liegt in der langsameren Verbrennung, hervorgerufen durch die Diffusionsflamme. Trotz alledem überwiegt der Vorteil der höheren Kompressionsverhältnisse beim Dieselmotor, was einen höheren Wirkungsgrad zur Folge hat [10].

2.2 Gemischbildung und Verbrennung

Die Gemischbildung und Verbrennung wird in die Teilbereiche Kraftstoffeinspritzung, Zerfall des Einspritzstrahles, Kraftstoffverdampfung, Diffusion sowie Zündung und Verbrennung unterteilt [3].

Der Zeitpunkt für den Einspritzbeginn muss streng eingehalten werden, da ein zu früher Einspritzbeginn dazu führen kann, dass die Verbrennung bereits vor dem OT abläuft, wodurch Temperatur und Druck zu früh ansteigen und diese bremsend auf den Motor wirken, was dazu führt, dass es zu einem Abfall des Wirkungsgrades und in weiterer Folge zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs kommt. Weiters steigen durch die hohen Temperaturen die NO_x-Emissionen stark an [8].

Im Gegensatz dazu sinkt die Temperatur im Brennraum bei zu spätem Einspritzbeginn, vor allem im Teillastbetrieb, ab. Dies führt dazu, dass nur ein Teil der Kraftstoffkomponenten an der Verbrennung teilnimmt, während die restlichen als unverbrannte HC-Emissionen über das Auslassventil ausgeschoben werden [8].

Der Einspritzbeginn stellt bezüglich der Emissionen somit kein Optimum, sondern lediglich einen Kompromiss zwischen Stickoxiden und unverbrannten Kohlenwasserstoffen, dar.

Wie zuvor bereits erwähnt werden bei Dieselmotoren anhand der konstruktiven Auslegung in Motoren mit geteilten Brennräumen (Kammermotoren) und mit ungeteilten Brennräumen unterschieden. Durch die räumliche Trennung der Vor- bzw. Wirbelkammer und dem Brennraum, wird von einer indirekten Einspritzung (IDI, indirect injection) gesprochen, da der Kraftstoff nicht direkt in den Brennraum, sondern in die jeweilige Kammer eingespritzt wird. Im Gegensatz dazu wird bei einer Direkteinspritzung (DI, direct injection) der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingespritzt. In modernen Dieselfahrzeugen werden nahezu nur noch DI eingesetzt [8], wobei die Untersuchung von Dieselmotoren historisch bedingt immer noch in Kammermotoren erfolgt, weshalb deren Funktionsprinzip erläutert wird. In Tab. 2-1 sind typische Nenndrehzahlen, Verdichtungsverhältnisse und effektive Mitteldrücke für Pkw und Nkw gegenübergestellt. Man kann erkennen, dass die Verdichtungsverhältnisse von DI- im Vergleich zu IDI- Motoren deutlich höher liegen was den thermischen Wirkungsgrad begünstigt [7].

Tab. 2-1: Vergleichsdaten für Dieselmotoren [8]

Einspritzsystem	Nenndrehzahl [min ⁻¹]	Verdichtungsverhältnis [-]	effektiver Mitteldruck [bar]
IDI Pkw Saugmotor	3 500...5 000	20...24	7...9
IDI Pkw mit Aufladung	3 500...4 500	20...24	9...12
DI Pkw Saugmotor	3 500...4 200	19...21	7...9
DI Pkw mit Aufladung u. LLK	3 600...4 400	16...20	8...22
DI Nkw Saugmotor	2 000...3 500	16...18	7...10
DI Nkw mit Aufladung	2 000...3 200	15...18	15...20
DI Nkw mit Aufladung u. LLK	1 800...2 600	16...18	15...25

2.2.1 Vorkammer

Die im Zylinderkopf angebrachte Vorkammer weist ein Volumen von ca. 35 % des Verdichtungsraumes auf und ist über einen oder mehrere Überströmkanäle mit dem Hauptbrennraum verbunden. Durch den Kompressionshub wird die in die Kammer einströmende Luft stark verwirbelt. Die Einspritzung erfolgt mit einer Zapfendüse bei relativ geringem Druck (bis 450 bar). Durch die speziell gestaltete Prallfläche, die den Kraftstoffstrahl zerteilt, sowie die heißen Vorkammerwände erfolgt die Zündung. Die in der Vorkammer einsetzende Verbrennung treibt durch die Druckerhöhung das teilverbrannte Luft- Kraftstoff- Gemisch mit bis zu 500 m/s durch die Kanäle in den Hauptbrennraum. Während der weiteren Verbrennung findet eine zusätzliche intensive Vermischung mit der im Brennraum vorhandenen Luft statt. [7, 8]

In Abb. 2-1 ist ein Model für ein Vorkammerverfahren inkl. der Anlasshilfe (5) für den Kaltstart aufgezeigt, welches im „Abwind“ des Luftstromes sitzt, um den Verbrennungslauf nicht zu stören [8].

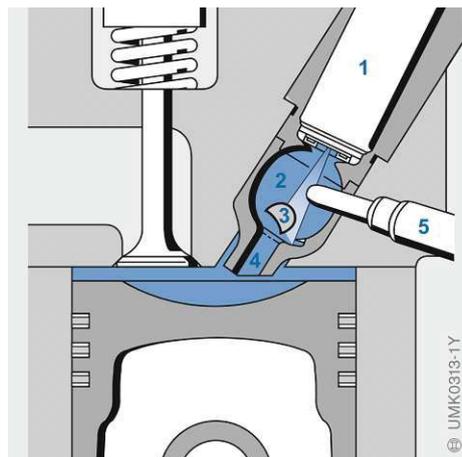


Abb. 2-1

- 1 Einspritzdüse
- 2 Vorkammer
- 3 Prallfläche
- 4 Strahlkanal
- 5 Glühstiftkerze

Abb. 2-1: Vorkammerverfahren [11]

2.2.2 Wirbelkammer

Die zweite Variante eines Kammermotors stellt die Wirbelkammer (Abb. 2-2) dar, welche ebenfalls im Zylinderkopf sitzt. Diese weist ein Volumen von ca. 60 % des Verdichtungsraumes auf. Diese kann kugel- oder scheibenförmig ausgeführt sein und ist über einen sogenannten Schusskanal mit dem Hauptbrennraum verbunden, welcher tangential in der Wirbelkammer mündet. Während der Verdichtung werden die Gase durch den Schusskanal in eine Wirbelbewegung versetzt. Der anschließende Kraftstoffstrahl durchdringt den Wirbel normal zu dessen Achse, bevor er auf der gegenüberliegenden heißen Wandzone auftrifft. Dabei gilt es zu beachten, dass die Gemischbildung möglichst vollständig in der Wirbelkammer erfolgt. Wie auch beim Vorkammermotor wird das Luft- Kraftstoff- Gemisch beim Brennbeginn in den

Zylinderraum verdrängt, wobei die Drosselverluste aufgrund der größeren Überströmquerschnitte deutlich geringer ausfallen, was zu einem Vorteil für den inneren Wirkungsgrad des Motors führt. Aufgrund der schnelleren Verbrennung sind diese Motoren im Vergleich zu den Vorkammermotoren in Bezug auf das Verbrennungsgeräusch im Nachteil [7, 8].

Somit bieten die Kammermotoren im Vergleich zu den DI diverse Vor- und Nachteile. Durch die heißen Kammerwände und ein fettes Gemisch zu Beginn der Verbrennung kommt es bei Kammermotoren zu einem kurzen Zündverzug, welcher mit der abgestuften Verbrennung zu einer geringeren Geräuschentwicklung und Motorbelastung führen. Dem gegenüber steht jedoch der höhere Kraftstoffverbrauch (bis zu 10 %), welcher vorrangig durch die Überströmverluste gegeben ist. Neben den Strömungsverlusten erhöhen sich aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten auch die Wärmeverluste [7].

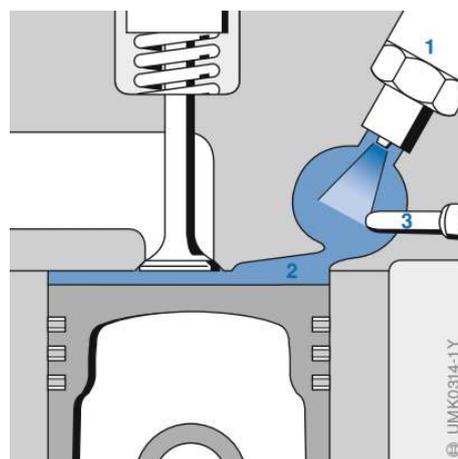


Abb. 2-2

- 1 Einspritzdüse
- 2 tangentialer Schusskanal
- 3 Glühstiftkerze

Abb. 2-2: Wirbelkammerverfahren [11]

2.2.3 Direkteinspritzer

Im Gegensatz zu den geteilten Brennräumen der Kammermotoren wird bei den ungeteilten Motoren der Kraftstoff direkt über den Injektor, der sich im Zylinderkopf befindet, in eine sich im Kolben befindende Mulde eingespritzt, wie in Abb. 2-3 zu sehen ist. Die Kraftstoffzerstäubung, -erwärmung, -verdampfung und die Vermischung mit der Luft müssen daher in einer kurzen zeitlichen Abfolge stehen. Dabei werden an die Kraftstoff- und Luftzuführung hohe Anforderungen gestellt [8].

Konstruktive Merkmale im Zylinderkopf, Ansaugtrakt und Brennraum sorgen für eine starke Luftverwirbelung (Drall) innerhalb des Zylinders, welche für die Gemischaufbereitung von Vorteil sind [3, 8, 12].

Für die Einspritzung kommen Mehrlochdüsen mit bis zu 12 Bohrungen und einem Einspritzdruck von 1 800 bis zu 3 000 bar zum Einsatz [5, 9, 10].

Der innere oder indizierte Mitteldruck (Gleichung (2-6)) ist äquivalent zu der auf den Kolben wirkenden spezifischen Arbeit und wird aus dem Zylinderdruckverlauf sowie dem Hubvolumen bestimmt [12].

$$p_{mi} = \frac{W_i}{V_H} = \frac{1}{V_H} \cdot \oint p \cdot dV \quad (2-1)$$

p_{mi}	indizierter Mitteldruck	[bar]
W_i	indizierte Arbeit	[J]
V_H	Hubvolumen	[dm ³]
p	Zylinderdruck	[bar]

Bei einem Viertaktmotor kann der indizierte Mitteldruck noch aufgeteilt werden auf jenen des Hochdruckteiles, sowie der Gaswechselschleife, bei welchem es sich zumeist um Verlustarbeit handelt (Ausnahme: aufgeladene Motoren) [12].

Die Berechnung des kurbelwinkelabhängigen Kolbenweges bzw. Zylindervolumens erfolgt nach Gleichung (2-2) und (2-3).

$$x(\varphi) = \frac{s}{2} \cdot (1 - \cos \varphi) + l \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{s}{2 \cdot l} \cdot \sin \varphi - \frac{\Delta - S}{l} \right)^2} \right) \quad (2-2)$$

$x(\varphi)$	Kolbenweg	[mm]
s	Kolbenhub	[mm]
φ	Kurbelwinkel	[°]
l	Pleuellänge	[mm]
Δ	Deachsierung	[mm]
S	Schränkung	[mm]

$$V(\varphi) = \frac{V_H}{\varepsilon - 1} + D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot x(\varphi) \quad (2-3)$$

$V(\varphi)$	Zylindervolumen	[mm ³]
V_H	Hubvolumen	[mm ³]
ε	Verdichtungsverhältnis	[-]
D	Bohrungsdurchmesser	[mm]
$x(\varphi)$	Kolbenweg	[mm]

2.3.2 Luft-Kraftstoff-Verhältnis

Bei der motorischen Verbrennung wird das Verhältnis aus der tatsächlich im Zylinder vorhandenen Luftmasse m_L zur stöchiometrischen Luftmasse $m_{L,St}$ als Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ (Gleichung (2-4)) bezeichnet.

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{L,St}} \quad (2-4)$$

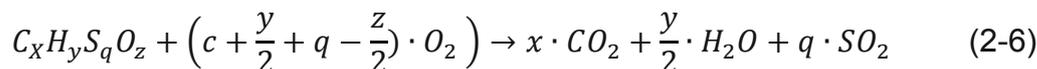
λ	Luftverhältnis	[-]
m_L	Vorhandene Luftmasse	[kg]
$m_{L,St}$	Stöchiom. Luftmasse	[kg]

Der stöchiometrische Luftbedarf L_{St} ist definiert als der Quotient aus der Luftmasse und der Kraftstoffmasse bei stöchiometrischen Verhältnissen [12] und lässt sich mit Formel (2-5) berechnen.

$$L_{St} = \frac{m_{L,St}}{m_K} \quad (2-5)$$

L_{St}	Stöchiom. Luftbedarf	[-]
$m_{L,St}$	Stöchiom. Luftmasse	[kg]
m_K	Kraftstoffmasse	[kg]

Der stöchiometrische Luftbedarf wird aus dem Sauerstoffbedarf der Verbrennungsreaktion (Gleichung (2-6)) bestimmt. Der Sauerstoffbedarf errechnet sich aus den Masseanteilen der im Kraftstoff vorhandenen chemischen Elemente und der Zusammensetzung der Ansaugluft. Berechnet man die Massen der an der Verbrennungsgleichung beteiligten Moleküle unter Berücksichtigung der nicht an der Reaktion beteiligten Bestandteile der Luft, so ergibt sich, dass ca. 14,5 kg Luft für die vollständige Verbrennung von 1 kg Dieselkraftstoff benötigt werden [5]. Ein Gemisch mit diesem Verhältnis wird als stöchiometrisch bezeichnet, mit $\lambda = 1$.



2.3.3 Heizverlauf

Der Heizverlauf stellt einen wichtigen Parameter für die Beurteilung der Verbrennung dar. Die Berechnung erfolgt über den Thermodynamik 2 Block in CONCERTO mithilfe des schnellen Heizgesetzes und variablem Polytropenexponent. Der differenzielle Heizverlauf (Gleichung (2-7)) beschreibt die Wärmefreisetzung in Abhängigkeit der Kurbelwinkelposition, während der integrale Heizverlauf die aufsummierte Wärmefreisetzung als zeitlichen Verlauf darstellt.

$$dQ_{1,2} = \frac{c_v \cdot V_2}{R} \cdot \left(p_2 - p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\kappa \right) \quad (2-7)$$

dQ_{mi}	Differenzieller Heizverlauf	[J/°KW]
c_v	Spezifische Wärmekapazität	[kJ/kgK]
R	Gaskonstante	[J/kgK]
V_H	Hubvolumen	[cm ³]
p_i	Zylinderdruck	[bar]
κ	Polytropenexponent	[-]

2.3.4 Umsatzpunkte

Als Umsatzpunkte werden jene Kurbelwinkelpositionen definiert, in denen ein bestimmter Prozentsatz der gesamten in den Brennraum eingebrachten chemischen Energie in Wärmeenergie umgesetzt ist. Diese werden vorrangig für die Analyse der Verbrennung verwendet und auch als Energieumsätze oder im Falle einer homogenen Gemischbildung, wie beim Ottomotor üblich, als Massenumsatzpunkte bezeichnet. Die Bestimmung der jeweiligen Position erfolgt mithilfe der Auswertung des integralen Heizverlaufes.

- **AI 5**

Aufgrund der schwierigen und ungenauen Bestimmung des realen Brennbeginnes wird oft der 5 % Umsatzpunkt als Brennbeginn herangezogen. Weitere gebräuchliche Definitionen des Brennbeginnes sind der AI 10 oder der erste messbare Druckanstieg im Zylinder.

- **AI 50**

Der Verbrennungsschwerpunkt ist entscheidend für den Motorwirkungsgrad. Für einen optimalen Wirkungsgrad sollte dieser bei ca. 7- 8 °KWnOT liegen. Der Verbrennungsschwerpunkt entspricht dabei der Abszisse des Flächenschwerpunktes des integralen Heizverlaufes. Dieser und der 50 % Umsatzpunkt stimmen nicht genau überein. Aufgrund der einfacheren Berechnung wird allerdings häufig der AI 50 als Verbrennungsschwerpunkt herangezogen.

- **AI 90**

Wie der Brennbeginn, wird auch das Brennende oft über den integralen Heizverlauf bestimmt. Die häufigsten in der Literatur verwendeten Werte dafür stellen der AI 90 und der AI 95 dar.

In [Abb. 2-4](#) sind die Umsatzpunkte, sowie der Einspritzzeitpunkt im Zylinderdrucksignal, dem differentiellen und integralen Heizverlauf eingetragen. Die ermittelten Werte beziehen sich auf eine Standardmessung des CFR-Motors und eines Tankstellenkraftstoffes.

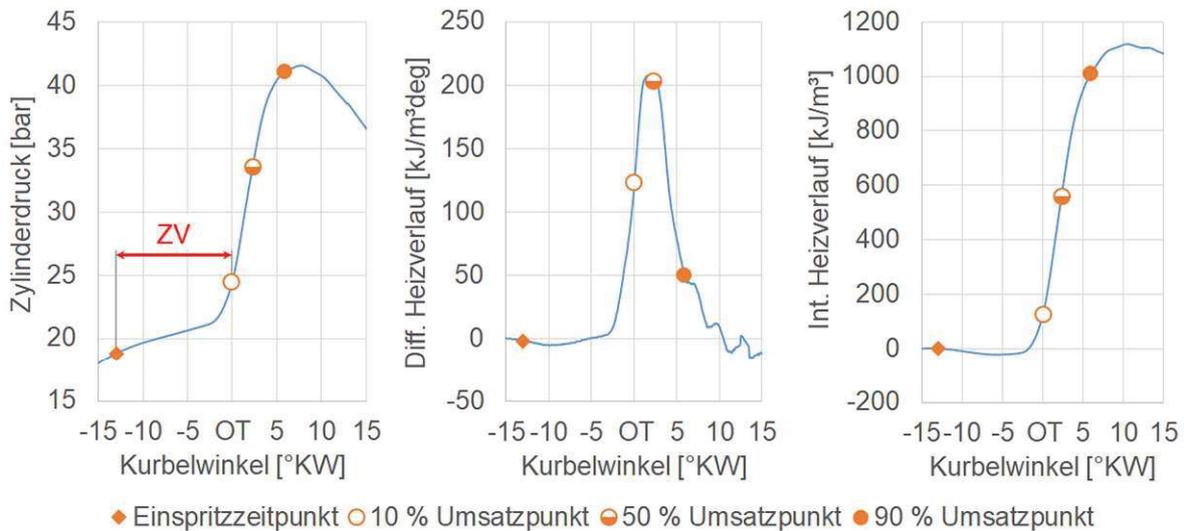


Abb. 2-4: Zylinderdruckverlauf CFR-Dieselmotor, differenzieller und integraler Heizverlauf mit Einspritzpunkt und Umsatzpunkten

2.3.5 Zündverzug

Als Zündverzugszeit wird die Zeitspanne zwischen Einspritzbeginn und Brennbeginn definiert. Der Zündverzugszeit setzt sich aus dem physikalischen und chemischen Zündverzugszeit zusammen, in welchem hoch komplexe Prozesse ablaufen [9].

Physikalischer Brennverzugszeit

Die wesentlichen physikalischen Vorgänge sind die Zerstäubung des Brennstoffes, die Verdampfung und die Mischung von Brennstoffdampf und Luft bis zur Bildung eines zündfähigen Gemisches und somit stark von den Eigenschaften des Brennstoffes, wie Viskosität, Siedeverlauf und Dichte abhängig [9, 12, 13].

Chemischer Zündverzugszeit

Der chemische Zündverzugszeit ist durch die Vorreaktionen, die für eine Zündung notwendig sind, charakterisiert. Als Zündung bezeichnet man den Übergang eines brennbaren Gemisches aus dem Zustand stabiler Koexistenz oder langsamer Reaktion zu einer raschen, mit Temperatur- und Drucksteigerung verbundenen Reaktion (Kettenreaktion), die sich durch eine warme Flamme zu erkennen gibt. Reaktionen, die nur zur Ausbildung kalter schwach leuchtender Flammen führen, sind nicht als Zündung zu werten [13, 14].

Eine Selbstzündung kann aufgrund der stabilen Ausgangsprodukte nur durch eine ausreichend hohe Temperatur erfolgen. Die Temperatur, bei welcher die Zündung ohne Fremdzündung erfolgt, nennt man Selbstzündungstemperatur. Während der chemischen Zündverzugszeit kommt es zu Kettenverzweigungsreaktionen mit der Bildung von Radikalen, welche für eine Zündung den Kettenabbruchreaktionen überwiegen müssen. Diese Reaktionen laufen, sollten sie nicht durch einen Zündfunken beschleunigt werden, relativ langsam ab [13, 14].

Die Zündung im niederen und mittleren Temperaturbereich, wie es bei der motorischen Verbrennung von Dieselkraftstoffen zumeist der Fall ist, ist durch die sogenannte Zweistufenzündung charakterisiert.

Im Niedertemperaturbereich ($T < 900 \text{ K}$) liegt ein komplexer Kettenmechanismus vor, welcher zu einem ersten Anstieg der Wärmefreisetzungsrate führt. Dieser wird noch nicht als thermische Reaktion angesehen, sondern als eine Reaktion, wie sie auch in der kalten Flamme abläuft, und hält bis zu einer Temperatur von ca. 900 K an. An diesem Punkt wird die Isomerisierungsreaktion (Abstraktion eines Wasserstoffatoms, welches an die O-O- Gruppe angelagert wird) unterbrochen. Stattdessen kommt es zu einer verstärkten Bildung von Alkenen und HO_2 - Radikalen. Diese Radikale reagieren weiter zu Wasserstoffperoxid (H_2O_2) welches sich bei 1000 K schnell zersetzt, die zweite Zündphase einleitet und als degenerierte Kettenverzweigung bezeichnet wird. Durch die Zersetzung von H_2O_2 werden große Mengen an OH-Radikalen produziert, die dazu führen, dass die Zündung beschleunigt wird. Es kommt zu einer zweiten Wärmefreisetzungsrate, die die Hochtemperaturoxidation einleitet [9, 12, 14].

In Abb. 2-5 ist die Zweistufenzündung erkennbar. Durchgeführt wurde diese Messung mit einer schnellen Kompressionsmaschine, die ein homogenes Gemisch durch den Kolbenhub verdichtet und im OT gehalten wird. Das Erreichen des OT in diesem Fall liegt bei etwa $9,3 \text{ ms}$, worauf der erste Zündverzögerung folgt [9].

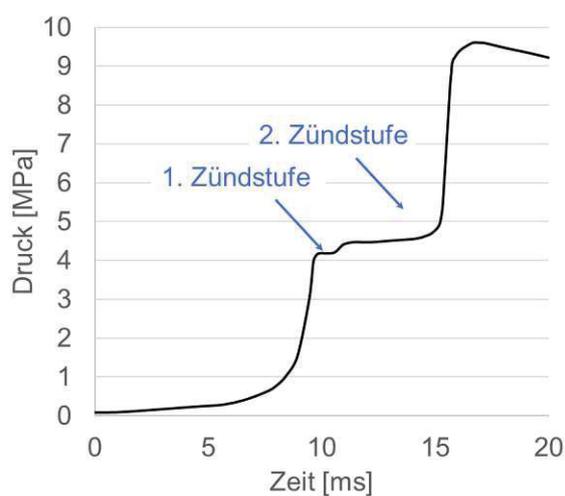


Abb. 2-5: Zündverzögerung eines Alkan-Luft-Gemisches in einer schnellen Kompressionsmaschine (nachbearbeitet) [9]

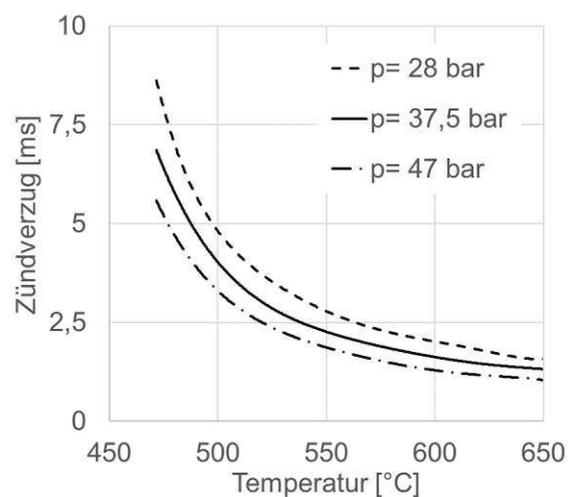


Abb. 2-6: Zündverzögerung in Abhängigkeit der Temperatur und des Druckes (nachbearbeitet) [15]

Die Zweistufenzündung bzw. der Prozess der degenerierten Kettenverzweigung erklären das Auftreten des in Abb. 2-7 schematisch dargestellten negativen Temperaturkoeffizienten (NTC), der die Tatsache belegt, dass die Zündverzögerungszeit mit steigender Ausgangstemperatur innerhalb des NTC-Regimes größer wird. Der NTC ist

abhängig vom Kraftstoff bzw. dessen Kettenstruktur. Bei langkettigen Alkanen ist dieser am stärksten ausgeprägt, während Alkene und Aromaten ein schwächeres bzw. kein NTC-Verhalten zeigen [9]. Weiters verschiebt sich der NTC-Bereich mit steigendem Druck zu höheren Temperaturen [16].

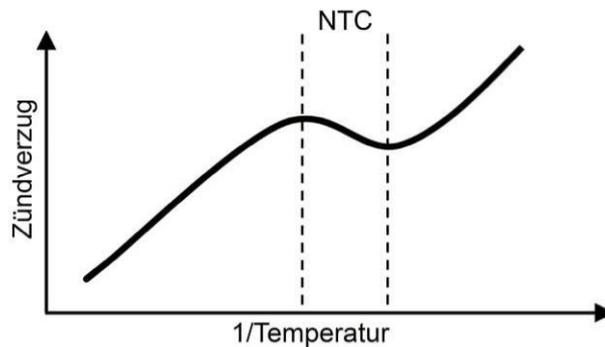


Abb. 2-7: Schematischer Verlauf der Zündverzugszeit mit ausgeprägtem NTC-Verhalten über den Kehrwert der Temperatur (nachbearbeitet) [16]

Parameter, die einen direkten Einfluss auf den Zündverzug haben, sind:

- **Temperatur**

Wie zuvor bereits erwähnt spielt die vorherrschende Temperatur eine große Rolle für den Zündverzug. Im Allgemeinen begünstigt eine hohe Gastemperatur gleichermaßen den physikalischen sowie den chemischen Zündverzug [12, 13]. Wie bereits beschrieben sinkt die Zündverzugszeit mit steigender Temperatur zwischen 300 und 600 °C stark ab, wohingegen die Abhängigkeit bei noch höheren Temperaturen geringer wird [17]. Die Temperaturabhängigkeit des Zündverzuges ist in [Abb. 2-6](#) aufgezeigt.

- **Druck**

Die Druckabhängigkeit ist gegenüber der Temperaturabhängigkeit geringer und tritt dann auf, wenn die chemischen Reaktionen zusammengesetzt sind und nicht elementar, also durch Auftreten von Zwischenprodukten (Bruttoreaktion) ablaufen. Wie bei niedrigen und hohen Temperaturen sind die Reaktionsabläufe bei Druckdifferenzen verschieden [14]. [Abb. 2-6](#) kann entnommen werden, dass ein geringerer Druck eine Zunahme des Zündverzuges zur Folge hat.

- **Ladungsbewegungen**

Die Ladungsbewegungen im Brennraum, wie sie vorrangig in Wirbelkammermotoren und DI-Motoren durch entsprechende konstruktive Merkmale (Turbulenzen, Drall, Tumble) hoch ausfallen können, beeinflussen den Zündverzug merklich, da sie zu einer besseren Gemischbildung führen [13, 18].

▪ **Wandinflüssen**

Diese können den Reaktionsverlauf außerordentlich stark verändern, auch wenn keine katalytisch wirkenden Stoffe eingesetzt werden. Eine Wand kann sowohl ketteneleitend (durch Bildung neuer Radikale), als auch kettenabbrechend wirken, insbesondere bei niedrigen Drücken [9, 14].

Am Dieselmotor kann die Zündverzugszeit über Temperatur und Druck zum Einspritzbeginn gesteuert werden, die wiederum von Einlasstemperatur und -druck, dem Verdichtungsverhältnis, dem Einspritzbeginn und den Wandtemperaturen [12].

2.4 Kraftstoffe

Brennstoffe, sowohl für die diesel-, als auch für die ottomotorische Verbrennung, setzen sich aus einer Vielzahl verschiedener Kohlenwasserstoffe ($C_xH_y[O_z]$) zusammen [9].

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Kraftstoffes werden aus Sicht der Chemie durch deren Molekülstruktur und die zugehörigen Bindungsverhältnisse bestimmt. Dabei beeinflusst das Verhältnis der Wasserstoff-, Kohlenstoff- und Sauerstoffatome direkt den Heizwert. Die Stärke der intermolekularen Bindungskräfte und Wechselwirkungen hingegen bestimmen wieviel Aktivierungsenergie aufgewendet werden muss, um die lokalen Bindungskräfte zu destabilisieren und den Start einer chemischen Reaktion auszulösen [19].

Die Einteilung der Kohlenwasserstoffe erfolgt in:

▪ **Aliphatische Kohlenwasserstoffe**

Dazu zählen Alkanen (Paraffine) die keine Doppelbindung aufweisen (gesättigt) und den größten Anteil in motorischen Brennstoffen darstellen und als reaktionsträge eingestuft werden. Weitere Vertreter sind Alkene (Olefine), welche eine oder mehrere Doppelbindungen aufweisen, sowie Alkine (Acetylene) mit mindestens einer Dreifachbindung, allesamt ungesättigt und reaktionsfreudig. Eine weitere Unterteilung erfolgt anhand der Struktur der Ketten, wobei zwischen n-Alkanen (geradkettig) und iso-Alkanen (verzweigt) unterschieden wird. [7, 9]

▪ **Alzyklische und aromatische Kohlenwasserstoffe**

Hierbei handelt es sich um ringförmig strukturierte Kohlenwasserstoffe (Benzolring), welche entweder nur Einfachbindungen aufweisen (Naphtalene) oder abwechslungsweise Einfach- und Doppelbindungen (Aromaten) aufweisen. Aromaten sind aufgrund der Doppelbindung reaktionsfreudiger als Naphtalene. Aromaten stellen nach den Alkanen die häufigste Fraktion in Dieselmotorkraftstoffen dar und sind maßgeblich für die Entstehung von Ruß verantwortlich. [7, 9]

- **Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe**

Weisen einen kettenförmigen Aufbau auf und sind insbesondere für Zünd- und Verbrennungsprozesse relevant. Sie werden gemäß ihrer funktionalen Gruppe in Alkohole, Ketone, Ether, Aldehyde, Karbonsäuren und Ester eingeteilt. [9]

Kriterien zur Beurteilung von Dieseldieselkraftstoffen sind unter anderem:

- **Siedeverhalten**

Grundsätzlich steigt die Siedetemperatur mit der Anzahl der Kohlenstoffatome an und auch die Zündfähigkeit nimmt mit zunehmender Kettenlänge zu [7, 9]. Ein niedriger Siedebeginn führt zu einem kaltegeeigneten Kraftstoff, aber auch zu niedrigeren Cetanzahlen und schlechteren Schmiereigenschaften, wodurch die Verschleißgefahr insbesondere für Einspritzsysteme steigt. Liegt dieser Wert zu hoch, kann es zu erhöhter Rußbildung und Düsenverkokung führen [8].

Durch die Einspritzung des Dieseldieselkraftstoffes in die heiße Luft im Zylinder, ist nicht die Siedelinie, sondern vielmehr die Lage des Siedende von Bedeutung [7].

- **Flammpunkt** [7]

Der Flammpunkt ist die Temperatur, bei der bei Umgebungsdruck so viel Kraftstoff verdampft, dass ein durch Fremdzündung entflammbares Gemisch entsteht. Für die motorische Verbrennung sind diese Temperaturen nicht direkt relevant, da deutlich höhere Drücke vorherrschen.

- **Zündtemperatur** [13]

Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur, bei welcher eine selbständige Entzündung des Kraftstoffs in einem offenen Gefäß erfolgt.

- **Viskosität** [8]

Eine zu niedrige Viskosität führt zu erhöhten Leckverlusten in der Einspritzpumpe und damit zu einem Leistungsmangel. Eine deutlich höhere Viskosität (z. B.: FAME) kann bei nicht druckgeregelten Einspritzsystemen zur Erhöhung des Spitzendruckes führen. Weiters kann es zu einer Veränderung des Spraybildes aufgrund der Bildung größerer Tropfen führen.

- **Dichte** [9]

Im Betrieb mit derselben Einspritzmenge nehmen die Motorleistungen und die Rußbildung mit steigender Dichte, aufgrund des zunehmenden Energieinhaltes des Dieseldieselkraftstoffes zu und umgekehrt.

- **Cetanzahl**

Die Cetanzahl wird in Kapitel 2.5 genauer erläutert.

2.4.1 Dieselkraftstoffe

Da die Zusammensetzung der aus Erdöl gewonnenen Brennstoffe je nach Herkunftsland variieren, werden in entsprechenden nationalen und internationalen Normen diverse Parameter reglementiert, um einen sicheren Motorlauf zu gewährleisten. Dazu zählen Limitierungen von diversen Stoffen, welche sich negativ auf die Verbrennung oder Abgasnachbehandlung auswirken können, wie bspw. Schwefel oder Mangan. [9]

Auf europäischer Ebene erfolgt diese Regulierung durch die DIN EN 590: 2017-08 [4], welche auch die klimatischen Bedingungen mit einbezieht. Einige der wichtigsten Eigenschaften sind in Tab. 2-2 dargestellt.

Tab. 2-2: Allgemein anwendbare Anforderungen für Dieselkraftstoffe [4]

Eigenschaft	Grenzwerte		Einheit
	Minimum	Maximum	
Cetanzahl	51	-	-
Cetanindex	46	-	-
Dichte bei 15 °C	820	845	kg/m ³
PAK	-	8,0	% (m/m)
Schwefelgehalt	-	10,0	mg/kg
Mangangehalt	-	2,0	mg/l
Flammpunkt	über 55	-	°C
FAME	-	7,0	% (V/V)
Viskosität bei 40 °C	2,0	4,5	mm ² /s

Dieseldieselkraftstoffe hoher Qualität zeichnen sich durch eine hohe Cetanzahl, ein relativ niedriges Siedeende, einer geringen Streuung der Dichte und Viskosität, einem niedrigen Aromaten- insbesondere Polyaromaten- (PAK) sowie einem geringen Schwefelgehalt aus [8].

Die Herstellung von konventionellen Dieseldieselkraftstoffen erfolgt durch Destillation von Rohöl aus den sogenannten Mitteldestillaten. Neben der einfachen atmosphärischen Destillation bis zu einer Siedetemperatur von ca. 370 °C und der Vakuumdestillation mit Siedetemperaturen oberhalb von ca. 370 °C stehen noch weitere Verfahren zur Verfügung. Dazu zählen unter anderem das thermische und katalytische Cracken sowie das Hydrocracken, mit dem Ziel die Ausbeute und/oder die Qualität der Kraftstoffkomponente zu erhöhen [3].

Um die Eigenschaften von Dieselkraftstoffen gezielt zu ändern bzw. zu verbessern können eine Vielzahl von Additiven zugeführt werden. Die Gesamtkonzentration der Additive liegt meist unter 0,1 %, sodass die physikalischen Kenngrößen der Kraftstoffe wie Dichte, Viskosität und Siedeverlauf nicht verändert werden [8].

Additive für einen Dieselkraftstoff können sein:

- **Fließverbesserer** bestehen aus polymeren Stoffen, die dazu beitragen, dass ein Einsatz der paraffinischen Komponenten, mit hoher Cetanzahl aber begrenztem Kälteverhalten, im Winter möglich ist. Diese verhindern nicht die Entstehung von Kristallen, hemmen aber deren Wachstum, sodass die Kraftstoffe filtrierbar bleiben [3, 8].
- **Detergents** sind Reinigungsadditive, die zur Reinhaltung des Einspritzsystems beitragen können und damit einer negativen Beeinflussung der Einspritzcharakteristik durch die Bildung von Ablagerungen und den Aufbau von Verkokungen entgegenwirken. Bei den eingesetzten Stoffen handelt es sich um komplexe organische Verbindungen, die allerdings eine Anpassung an die Einspritztechnologie erfordern [3, 8].
- **Zündbeschleuniger** kommen für eine wirtschaftliche Anhebung der Zündwilligkeit zum Einsatz. Verwendet werden Alkylnitrate, Azoverbindungen oder organische Peroxide. Diese Substanzen sind thermisch labil und bewirken durch die Freisetzung reaktiver Komponenten eine frühere Entzündung. In der kommerziellen Anwendung hat sich insbesondere Ethyl-Hexyl-Nitrat bewährt. Je nach Grundkraftstoff sind dabei Verbesserungen von bis zu fünf Einheiten möglich [3, 12, 20].
- Weitere verbreitete Additive stellen beispielsweise Korrosionsschutz-, Antioxidantien-, Schaumdämpfer-, Verschleißschutzadditive, sowie viele andere dar.

2.4.2 FAME (Fatty Acid Methyl Ester)

FAME oft auch als Biodiesel bezeichnet, basiert in Europa im Wesentlichen auf umgeesterten Rapsöl, wobei auch andere Pflanzenöle, sowie tierische Fette für die Produktion herangezogen werden können [9, 21]. Biodiesel gehört zu den Pflanzenölkraftstoffen der sogenannten ersten Generation und steht damit in Flächen- und Nutzungskonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion, Ausnahme sind Pflanzen, die auf erodierten Böden wachsen, wie z.B. Jatropha [9].

Beim Veresterungsprozess wird das Öl unter Zugabe von Methanol zu Monoalkoholester und wirtschaftlich nutzbarem Glycerin umgewandelt [9]. Durch die Aufspaltung der langkettigen und verzweigten Verbindungen bilden sich die kürzeren und zündwilligeren FAME- Kraftstoffe. Dieser Prozess der Umesterung erfordert einen

gewissen verfahrenstechnischen Aufwand und ist energieintensiv, sodass die Energiebilanz schlechter wird [7, 22]. Die Erzeugung von FAME ist im Vergleich zu mineralölbasierten Dieselkraftstoffen nicht wirtschaftlich und wird in Deutschland und Österreich steuerlich begünstigt [8, 23].

Die verschiedenen spezifischen Eigenschaften nach der Veresterung, sowie auch die Namensgebung der FAME-Kraftstoffe werden durch das ursprüngliche Pflanzenöl bestimmt. Das heißt, FAME auf Rapsölbasis (Rapsmethylester) weist andere Eigenschaften als FAME auf Soja- oder Palmölbasis auf [22].

Die Beimischung von Biodiesel zu herkömmlichem Dieselkraftstoff wird, je nach Anteil als B7, B10 oder B30 bezeichnet. Dies entspricht einem Anteil von 7, 10, oder 30 % an Biodiesel [21].

Der Einsatz von FAME Kraftstoffen stellt kein grundsätzliches Problem dar, wobei einige Besonderheiten bezüglich der Zünd- und Verbrennungseigenschaften, thermischen Stabilität (Alterung), sowie der Rückwirkung auf das tribologische System zu beachten sind [21]. Weiters sind Rapsmethylester deutlich aggressiver als vergleichbare mineralische Kraftstoffe und können sogar Stahlrohrleitungen und Dichtungen angreifen, weshalb auch die Dichtungs- und Lackverträglichkeit beachtet werden muss. Die Schmiereigenschaften hingegen sind deutlich besser [21, 22].

Im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff weisen FAME zum Teil einen deutlich anderen Siedeverlauf auf. Anhand von Abb. 2-8 kann man von RME feststellen, dass der Siedebeginn bei wesentlich höheren Temperaturen liegt.

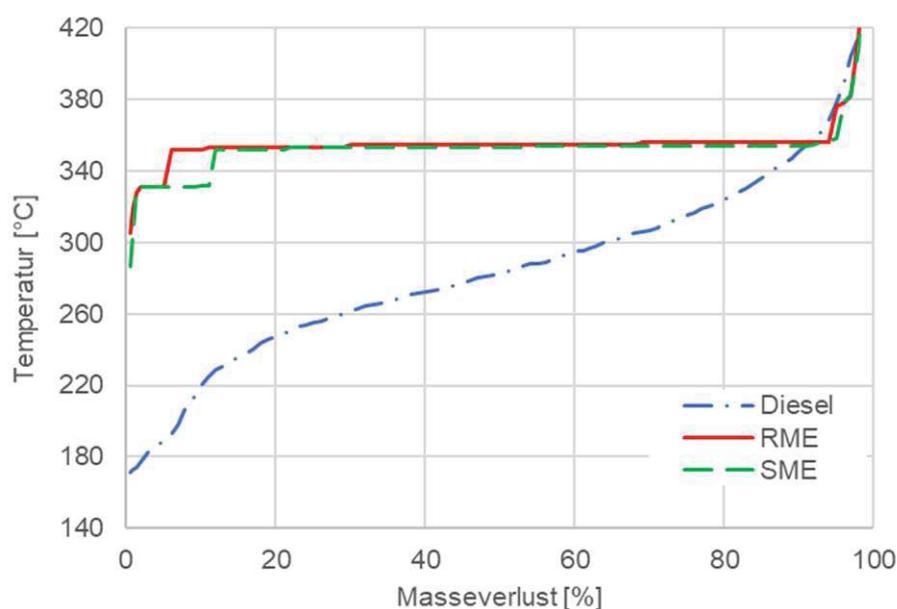


Abb. 2-8: Typische Siedelinien für Diesel, RME und SME (nachbearbeitet) [24]

Insbesondere bei Dieselmotoren mit Dieselpartikelfilter (DPF) gelangen während der Regeneration Kraftstoffkomponenten ins Motoröl. Im Vergleich zu konventionellen

Dieselmotoren lassen sich diese nicht vollständig verdampfen, was verkürzte Ölwechselintervalle zur Folge hat [3, 25].

In reinem Biodiesel werden als Additive Oxidationsstabilisatoren und Fließfähigkeitsverbesserer eingesetzt [3]. Alle relevanten Eigenschaften, sowie Prüfverfahren der FAME-Kraftstoffe sind durch die EN 14214 [26] geregelt, ein Auszug ist in Tab. 2-3 dargestellt.

Tab. 2-3: Allgemein anwendbare Anforderungen für FAME-Kraftstoffe [26]

Eigenschaft	Grenzwerte		Einheit
	Minimum	Maximum	
FAME-Gehalt	96,5	-	% (m/m)
Cetanzahl	51	-	-
Dichte bei 15 °C	860	900	kg/m ³
Methanol-Gehalt	-	0,2	% (m/m)
Gesamt-Glycerin	-	0,25	% (m/m)
Flammpunkt	101	-	°C
Viskosität bei 40 °C	3,5	5,0	mm ² /s

2.5 Zündwilligkeit und Prüfverfahren

Im Gegensatz zu einem Ottokraftstoff bei welchem eine geringe Zündwilligkeit, also eine hohe Klopfestigkeit gefordert wird, verhält es sich für einen Dieselmotoren genau umgekehrt [27]. Bei der Zündwilligkeit handelt es sich um ein beschreibendes Qualitätskriterium von Dieselmotoren, welche durch den Zündverzöger bestimmt wird.

Durch die thermische Belastung im Brennraum, bedingt durch die Kompression des Arbeitsgases, beginnen die Moleküle immer stärker zu schwingen. Je kürzer oder auch verzweigter die Molekülketten sind, desto weniger schnell brechen diese auseinander und oxidieren. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Zündwilligkeit mit steigender Kettenlänge ansteigt [28].

Nach bisherigen Erfahrungen kann die Zündwilligkeit für Dieselmotoren mit Laborprüfgeräten nicht exakt bestimmt werden. Für eine Aussage mit ausreichender Genauigkeit haben sich zuletzt zwei genormte Prüfverfahren mittels Prüfmotor durchgesetzt. Weltweiten Standard stellt dabei der CFR-Prüfmotor entsprechend DIN EN ISO 5165 [29] bzw. ASTM D613 [30] dar, sowie in Deutschland der BASF-Prüfmotor laut DIN EN 16906 [31], welcher erst seit kurzem in die europäische Norm aufgenommen wurde [3].

Eine höhere Zündwilligkeit bietet bezüglich der motorischen Verbrennung einige Vorteile. Dazu zählen, dass mit steigender Zündwilligkeit ein besserer Energieumsatz, sowie bessere Kaltstarteigenschaften erzielt werden können. Weiters sinken die Emissionen und die Verbrennung erfolgt leiser. Der Grund dafür liegt darin, dass einem Kraftstoff mit langem Zündverzug mehr Zeit für die Gemischaufbereitung zur Verfügung steht, was beim Entzünden mit einer harten Verbrennung (Dieselnageln) einhergeht [7, 10].

Der Zündverzug gilt beim Dieselmotor als leistungsbegrenzendes Merkmal, wodurch die maximal abgegebene Leistung bei etwa $5\ 500\ \text{min}^{-1}$ liegt [32].

2.5.1 Cetanzahl

Die Ermittlung der Cetanzahl (CZ) erfolgt durch Vergleich mit Mischungen aus zwei Vergleichskraftstoffen. Bei den Primärkraftstoffen handelt es sich um das zündunwillige 1-Methylnaphtalin (α -Methylnaphtalin) sowie das namengebende und sehr zündwillige n-Hexadekan (n-Cetan), welches das früher verwendete Ceten aufgrund seiner besseren Lagerbeständigkeit ersetzte [8, 14, 33].

Die Cetanzahl eines Kraftstoffes wird bestimmt durch das Mischungsverhältnis der Primärreferenzkraftstoffe, die denselben Zündverzug aufweist wie der Prüfkraftstoff. Sie wird angegeben als der prozentuelle Anteil des zündwilligen n-Cetan der Kraftstoffmischung. Eine Mischung aus 51 % Cetan und 49 % α -Methylnaphtalin entspricht definitionsgemäß einer Cetanzahl von 51.

Während der Zündverzug in ms oder in $^{\circ}\text{KW}$ angegeben wird, wird die Cetanzahl durch den Vergleich mit Referenzkraftstoffen als einheitslose Kennzahl angegeben. Ein kurzer Zündverzug führt sowohl zu einer hohen Zündwilligkeit als auch Cetanzahl und umgekehrt.

Die Mindestanforderung auf europäischer Ebene durch die DIN EN 590 [4] schreibt einen Wert für die Cetanzahl für Dieselkraftstoffe von 51 CZ vor.

2.5.2 Referenzkraftstoffe

Für die verwendeten Bezugsstoffe müssen diverse Kriterien erfüllt sein, um eine sinnvolle Aussage über den zu prüfenden Kraftstoff zu treffen. Diese müssen [14]:

- 1) genügend große Unterschiede zwischen den Endpunkten der Skala ergeben, um alle in Frage kommenden Stoffe zwischen diesen Extremwerten zu erfassen,
- 2) gleiches Verhalten gegenüber den typischen praktisch in Frage kommenden Einflüssen aufzuweisen, wie die untersuchten Stoffe,
- 3) in vollkommen gleicher Qualität immer wieder beschafft werden können,
- 4) gut lagerbeständig sein,
- 5) preislich möglichst günstig liegen.

Referenzkraftstoffe, die diese Kriterien erfüllen und für die Versuchsreihen verwendet werden, sind zum einen die primären Referenzkraftstoffe (PRK) n-Hexadecan und 1-Methylnaphthalin [31, 34], sowie die T/U-Kraftstoffe welche als sekundäre Referenzkraftstoffe bezeichnet werden [30].

- **n-Hexadecan** (Abb. 2-9) oder auch n-Cetan ist eine bei Raumtemperatur farblose Flüssigkeit mit benzinartigem Geruch, welches der Gruppe der aliphatischen, gesättigten Kohlenwasserstoffe angehört. Genauer handelt es sich dabei um ein unverzweigtes Alken bzw. Paraffin mit der Summenformel $C_{16}H_{34}$. Chemisch zeichnet sich Cetan dadurch aus, dass es schwer entzündbar, bei starker Erwärmung allerdings auch ohne Einwirkung einer Zündquelle sehr zündwillig ist. Der Flammpunkt liegt bei $133\text{ }^{\circ}\text{C}$, während die Zündtemperatur bei $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Definitionsgemäß wird Cetan die Cetanzahl 100 zugeordnet. Der Schmelzpunkt liegt bei $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, worauf bei der Lagerung zu achten ist [34, 35].

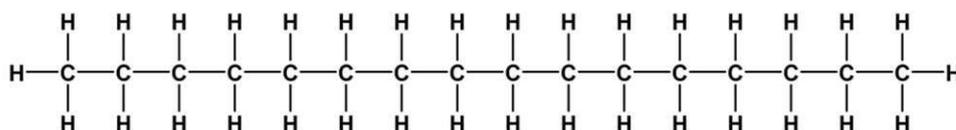


Abb. 2-9: Strukturformel n-Hexadecan [27]

- **1-Methylnaphthalin** (Abb. 2-10) auch als Alpha-Methylnaphthalin (AMN) bekannt, ist ebenfalls eine Flüssigkeit mit gelblicher Färbung und aromatischem Geruch, mit der Summenformel $C_{11}H_{10}$. Der Schmelzpunkt liegt bei $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ und stellt somit bei normalem Gebrauch keine Probleme dar. Im Gegensatz zu n-Cetan gehört AMN der Gruppe der aromatischen, polyzyklischen Kohlenwasserstoffe an, dessen Flammpunkt bei $94\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Zündtemperatur bei $485\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt [35]. AMN wird die Cetanzahl Null zugeordnet.

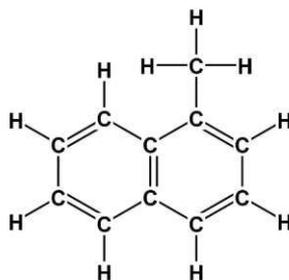


Abb. 2-10: Strukturformel α -Methylnaphthalin [27]

- **T/U-Kraftstoffe** werden ebenfalls, wie die Primärkraftstoffe volumetrisch gemischt, wobei der Kraftstoff T eine hohe und U eine geringe Cetanzahl aufweist. Die Bestimmung der Cetanzahl der beiden Sekundärkraftstoffe erfolgt ebenfalls mithilfe der Primärkraftstoffe.

- **IFA-Diesel** Hierbei handelt es sich um einen CEC Dieselkraftstoff¹ des IFA der TU-Wien. Dieser dient vorrangig zur Überprüfung der beiden Motoren.

Neben den hier erläuterten Referenzkraftstoffen existieren noch weitere, bei denen jedoch nur auf die zugehörigen Normen verwiesen wird. Die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften der für die Versuche verwendeten Referenzkraftstoffe sind in Tab. 2-4 dargestellt.

Tab. 2-4: Chemische und physikalische Eigenschaften der Referenzkraftstoffe [14, 35] [A1]

Kennwert		Einheit	CEC-D.	n-Cetan	AMN	U-21	T-28
Dichte	ρ	g/cm ³	0,83 ¹⁾	0,77 ²⁾	1,02 ²⁾	0,78 ¹⁾	0,80 ¹⁾
Unterer Heizwert	H _u	MJ/kg	k. A.	43,8	38,1	k. A.	k. A.
Viskosität	ν	mm ² /s	2,7 ³⁾	3,1 ²⁾	4,5 ²⁾	1,1 ³⁾	2,4 ³⁾
Cetanzahl	CZ	-	53,4	100	0	21,9	77,1
Flammpunkt	T _F	°C	65,7	133	94	26,7	82,2
Siedepunkt	T _S	°C	-	287	245	-	-

¹⁾ 15 °C, ²⁾ 20 °C, ³⁾ 40 °C

Wie sonst übliche Tankstellenkraftstoffe setzen sich sowohl der CEC-Diesel, also auch die beiden T/U-Kraftstoffe aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffverbindungen zusammen [30], deren Siedeverhalten sich in einer Siedelinie zeigt und daher keinen definierten Siedepunkt aufweisen.

2.5.3 Cetanindex

Der neben der Cetan-Zahl in der Norm angegebene Cetanindex CI wird ersatzweise aus Dichte und Siedeverhalten des Kraftstoffes errechnet. Für die vorliegende Arbeit ist dieser nicht relevant und wird deshalb nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Der ermittelte Cetanindex korreliert nur bedingt mit der an den Prüfmotoren ermittelten Cetanzahl, da dieser die heute durchweg verwendeten Zündbeschleuniger nicht darstellen kann [12]. Bei reinen fossilen Dieselkraftstoffen liegt die Cetanzahl um etwa drei Punkte niedriger als der Cetanindex [14].

¹ CEC (Coordinating European Council) Kraftstoffe sind Kraftstoffe, die für Vergleichsmessungen, gesetzliche Zulassungen, Motorölerprobung usw. herangezogen werden, die in Zusammenarbeit aller Beteiligten definiert werden können.

2.5.4 CFR-Prüfmotor

Der WAUKESHA CFR-Motor (Abb. 2-11) ist ein Prüfmotor entsprechend EN ISO 5165, sowie ASTM D613, mit dessen Hilfe die Cetanzahl durch ein variables Verdichtungsverhältnis bestimmt werden kann und weltweit zum Einsatz kommt. Erstmalige Verwendung fand der in den USA entwickelte Motor im Jahre 1938 und gilt bis heute als Standard, worauf sich weiteren Prüfmethode noch immer beziehen [36].



Abb. 2-11: CFR-Prüfmotor für die Bestimmung der Cetanzahl am IFA-Institut der TU-Wien

Der Viertakt-Einzylinderprüfmotor verfügt über ein variables, stufenlos einstellbares Verdichtungsverhältnis sowie eine Vorkammereinspritzung, wie in Abb. 4-10 gezeigt. Über die Position des Verstellkolbens im Zylinderkopf, welche über ein Handrad verändert wird, kann ein Verdichtungsverhältnis von 8: 1 bis zu 36: 1 realisiert werden. Die zylindrische Bohrung für den Verstellkolben fungiert zusätzlich als Vorkammer, in der die Einspritzdüse angebracht ist. Aufgrund dieses großen Bereiches des Verdichtungsverhältnis können theoretisch Cetanwerte zwischen 0 und 100 CZ bestimmt werden, wobei in der Praxis meist der Bereich zwischen 30 bis 65 CZ genutzt wird [30]. Zündwilligere Kraftstoffe müssen bei einem vorgegebenen Zündverzögerung von 13 °KW entsprechend weniger verdichtet werden, als jene mit einer geringeren Cetanzahl. Ein hohes Verdichtungsverhältnis entspricht somit einem Kraftstoff mit einer geringen Cetanzahl.

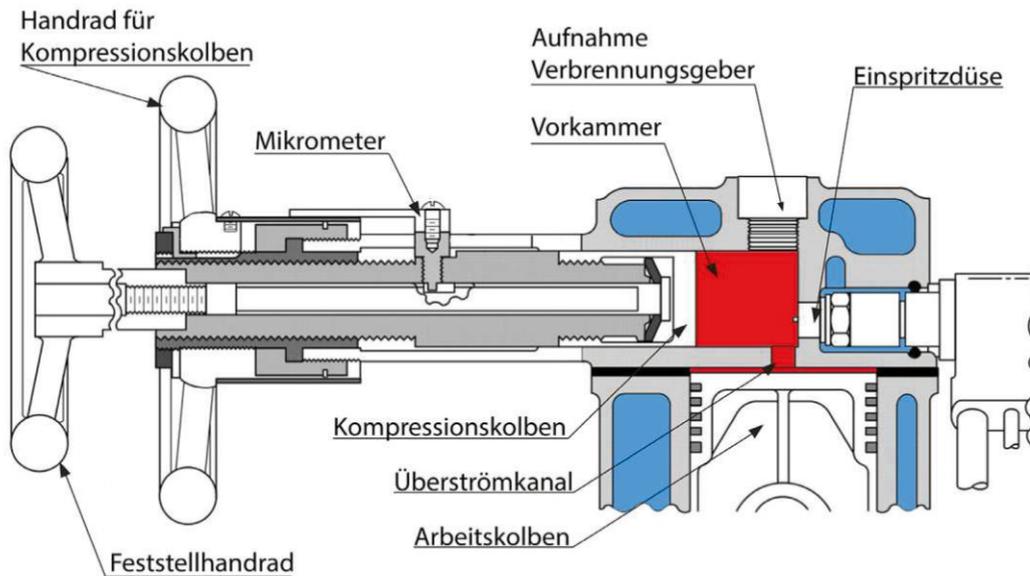


Abb. 2-12: Schnittbild CFR-Zylinderkopf inkl. Verstelleinheit (bearbeitet) [37]

Das Verdichtungsverhältnis kann durch eine entsprechende Umrechnung des Ablesewertes am Handrad unter Zuhilfenahme von Tabellen bzw. Diagrammen bestimmt werden. Durch die tabellarisch vorgegebenen Werte [38] konnte ein Polynom vierten Grades (Formel (2-8)) mit dem Bestimmungsmaß $R^2=0,9999$ ermittelt werden. Für die Bestimmung der Cetanzahl ist das Verdichtungsverhältnis irrelevant, hingegen für die Indizierung (Kapitel 2.3) essenziell. Der Verstellkolben stellt ein bewegliches Bauteil dar, welches trotzdem eine Abdichtung zwischen Zylinder und Bohrung gewährleisten muss, um die Blowby-Verluste gering zu halten. Anstelle von Kolbenringen erfolgt die Abdichtung durch die Verbrennungsrückstände an den Kontaktflächen.

$$\varepsilon = 1,99 * H^4 - 16,59 * H^3 + 53,56 * H^2 - 83,43 * H + 63,51 \quad (2-8)$$

ε	Verdichtungsverhältnis	[-]
H	Handradstellung	[-]

Die Gemischaufbereitung erfolgt in der Vorkammer mit Hilfe einer mechanischen Einspritzdüse. Die Düse wird direkt über einen Wassermantel im Zylinderkopf gekühlt. Die Temperaturregelung erfolgt über ein handbetätigtes Nadelventil, welches die Kühlwasserzufuhr drosselt. Die Temperatur des Kühlwassermantels um die Einspritzdüse, in der Literatur als Düsentemperatur beschrieben, wird durch die Norm vorgegeben. Die Kraftstoffförderung erfolgt über eine Reiheneinspritzpumpe der Firma BOSCH und kann während des laufenden Betriebes hinsichtlich Fördermenge sowie Einspritzzeitpunkt stufenlos über Mikrometerschrauben verstellt werden. Der

Einspritzdruck ist im Vergleich zu modernen Dieseldirekteinspritzmotoren (bis 2500 bar) mit 103 bar relativ gering [12].

Die vom Motor angesaugte Luftmenge strömt ungedrosselt in den Zylinder. Um die Randbedingungen der einzelnen Messungen konstant zu halten, wird die Ansaugluft vorkonditioniert. Die Umgebungsluft wird im Ansaugtrakt über eine elektrische Heizwendel geführt, um den Luftmassenstrom auf das gewünschte Niveau zu heben. Die erlaubte maximale Abweichung vom Sollwert liegt in einem engen Bereich von $\pm 0,5$ °C.

Einen weiteren Einfluss stellt eine konstante Motortemperatur dar, wobei auf eine Siedekühlung zurückgegriffen wird. Das, durch die Verbrennung sowie Reibungen, aufgeheizte Wasser im Kühlmantel zirkuliert aufgrund der temperaturbedingten Dichteunterschiede selbstständig, wodurch die Wassermanteltemperatur immer auf einem konstanten Niveau gehalten wird. In einem Kondensationsbehälter erfolgt eine Kondensation des verdampften Wassers über eine Kühlwendel mit separatem Wasserkreislauf.

Der zum Anlassen des Verbrennungsmotors und im Schleppbetrieb genutzte Elektromotor, eine dreiphasige Synchron-Reluktanz-Maschine, fungiert im befeuerten Betrieb als Belastungsmaschine und garantiert einen konstanten Motorlauf bezüglich der Drehzahl. Eine konstante Drehzahl ist wichtig, da der Zündverzug zwar in °KW gemessen wird, aber zeitabhängig ist. Die Koppelung erfolgt über zwei Keilriemen.

Der gusseiserne Arbeitskolben weist einen flachen Kolbenboden und fünf Kolbenringe auf, wovon vier als Kompressionsringe und einer als Ölabstreifring ausgebildet sind.

Der Motor verfügt über drei Kraftstoffbehälter, zwischen denen mithilfe des Kegelventils umgeschaltet werden kann, womit die Gefahr von Vermischungen der Kraftstoffe minimiert wird.

Für die Kalibrierung des integrierten Messsystems dient eine Markierung auf der Schwungscheibe auf der Hinterseite des Motors, sowie zwei induktive Geber. Der erste Geber generiert ein Signal bei 13 °KWvOT, also genau zu jenem Zeitpunkt, an dem die Einspritzung zu erfolgen hat. Das zweite Gebersignal erfolgt in Drehrichtung 13 °KW später, wenn sich der Arbeitskolben exakt im OT befindet.

Tab. 2-5 zeigt einige der konstruktiven Merkmale des CFR-Motors, sowie auch die Einstellungsparameter für eine normgerechte Messung.

Tab. 2-5: Technische Daten sowie Betriebsparameter am CFR-Prüfmotor für eine normgerechte Messung [30]

Parameter		Wert	Einheit
Bohrung	D	82,6 (3.25")	mm
Hub	s	114,3 (4.50")	mm
Hubvolumen	V_h	611,7	cm ³
Verdichtungsverhältnis	ε	8: 1 – 36: 1	-
Drehzahl	n	900 ± 9	min ⁻¹
Kraftstoffdurchsatz	\dot{V}_B	13 ± 0,2	ml/min
Düseneinspritzdruck	$p_{Dü}$	10,3 ± 0,34	MPa
Kühlmitteltemperatur	ϑ_{Km}	100 ± 2	°C
Ansauglufttemperatur	$\vartheta_{Ansaugluft}$	66 ± 0.5	°C
Kraftstofftemperatur	ϑ_{Kst}	18 - 32	°C
Düsenkühlung	$\vartheta_{Dükü}$	38 ± 3	°C
Einspritzzeitpunkt	EB	13	°KWvZOT
Verbrennungsbeginn	VB	OT	
Zündverzug	ZV	2,41	ms
Einspritzmenge/ Zyklus	v_B	28,9	μl

2.5.5 BASF-Prüfmotor

Wie beim CFR-Motor handelt es sich beim BASF-Motor um einen stehenden Viertakt-Einzylinderprüfmotor entsprechend DIN EN 16906:2017 [31]. Der Motor *KD 12 E* der Firma MWM (MOTOREN-WERKE MANNHEIM) gilt seit seiner Entwicklung als zuverlässige Messmethode für die Bestimmung der Cetanzahl von Dieselmotoren. Der entsprechende Motor ist in [Abb. 2-13](#) abgebildet.



Abb. 2-13: BASF-Prüfmotor zur Bestimmung der Cetanzahl am IFA-Institut der TU-Wien

Bezüglich Brennraum unterscheidet sich der BASF stark vom CFR-Motor. Der BASF-Prüfmotor verfügt über ein konstantes Verdichtungsverhältnis sowie eine kugelförmige Wirbelkammer (Abb. 2-14), wohingegen der CFR-Motor eine zylindrische Vorkammer besitzt.

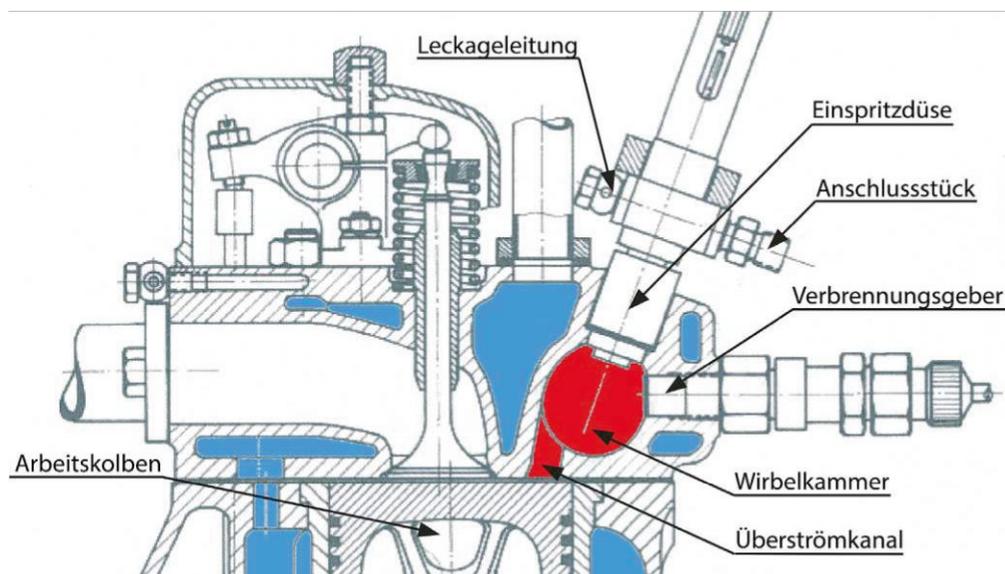


Abb. 2-14: Schnittbild BASF-Zylinderkopf mit Anbauteilen (bearbeitet) [34]

Wie am CFR ermöglicht die Dieselpumpe während des laufenden Betriebes eine Verstellung der Einspritzmenge sowie des Einspritzzeitpunktes. Die verbaute Einspritzdüse wird vor der Montage auf einen Abspritzdruck von 125 bar eingestellt. Eine Düsenkühlung ist bei diesem Motor nicht vorgesehen.

Einen weiteren Unterschied zum CFR-Motor stellt die Ansaugung dar. Die Bestimmung der Cetanzahl erfolgt bei diesem Motor nicht über eine Änderung des Verdichtungsverhältnisses, sondern über eine Änderung der angesaugten Luftmenge. Dieser Motor wird demnach im gedrosselten Zustand betrieben. Die Frischluft wird auf der Hinterseite des Bedienpultes angesaugt und gelangt über eine Drossel in den Beruhigungsbehälter. Dieser befindet sich direkt im Bedienpult und fasst ein Volumen von knapp 10 l. Dieses dient dazu, die Druckschwankungen nach der Drossel zu dämpfen, in der die Unterdruckmessung stattfindet. Die Unterdruckbestimmung erfolgt mithilfe eines Venturi-Rohres über ein analoges Barometer. Je nach Drosselstellung ändert sich durch die Strömungsgeschwindigkeit der Druck. Bei einer geringen Androsselung (Drossel weit geöffnet) nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu, wodurch der statische Druck absinkt und umgekehrt. Der an der Venturidüse vorherrschende Unterdruck kann sowohl als dimensionslose Größe in Prozent, als auch in $mmWS^2$ (Millimeter Wassersäule) abgelesen werden. Die Skala reicht dabei von 0 % (0 $mmWS$) bis 100 % bzw. -600 $mmWS$. Die Ansaugluft wird im Vergleich zum CFR nicht konditioniert.

Auslasseitig befindet sich am BASF-Motor lediglich ein Schalldämpfer. Es ist bei der Montage darauf zu achten, dass weder ein zu hoher Gegendruck, bspw. durch einen Katalysator, noch ein Unterdruck durch eine Absaugvorrichtung entstehen kann.

Die Kühlung des Motors erfolgt, wie auch beim CFR-Motor, über eine Verdampfungskühlung im Kondensationsgefäß mit Frischwasserkühlschlangen zur Kondensation. Dies garantiert eine konstante Kühlwassertemperatur.

Der BASF-Prüfmotor verfügt über einen dreiphasigen Drehstrom-Synchronmotor, welcher sowohl als Anlassmotor, aber auch als Belastungsmaschine verwendet werden kann. Bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} arbeitet dieser mit einer Leistung von 4 kW. Im Vergleich zum CFR-Motor ist dieser Bremsmotor zusätzlich in der Lage die erzeugte Leistung wieder ins Netz einzuspeisen.

Beim Arbeitskolben handelt es sich um einen Leichtmetallkolben mit drei Kompressionsringen und zwei Ölabstreifringen. Anders als beim CFR-Motor arbeitet dieser in einer nassen Lauffuchse.

Ferner verfügt der BASF über zwei Kraftstoffbehälter, zwischen welchen umgeschaltet werden kann. Die Gefahr einer Verunreinigung durch Vermischung beim Wechseln der Kraftstoffe ist höher, auch aufgrund eines nicht vorhandenen Ventiles für einen Spülvorgang.

Die technischen Daten sowie Betriebsparameter sind in [Tab. 2-6](#) aufgelistet.

² 1 mmWS \triangleq 9.81 Pa [39]

Tab. 2-6: Technische Daten sowie Betriebsparameter am BASF-Prüfmotor für eine normgerechte Messung [31, 34]

Parameter		Wert	Einheit
Bohrung	D	95	mm
Hub	S	120	mm
Hubvolumen	V_h	850,6	cm ³
Verdichtungsverhältnis	E	18,2: 1	-
Drehzahl	n	1 000 + 10	min ⁻¹
Kraftstoffdurchsatz	\dot{v}_B	8 ± 0.16	ml/min
Düseneinspritzdruck	$p_{Dü}$	12,5	MPa
Kühlmitteltemperatur	ϑ_{Km}	100 ± 2	°C
Ansauglufttemperatur	$\vartheta_{Ansaugluft}$	Umgebungstemperatur	°C
Einspritzzeitpunkt	EB	20	°KWvZOT
Verbrennungsbeginn	VB	OT	
Zündverzögerung	ZV	3,33	ms
Einspritzmenge/ Zyklus	v_B	16	µl

2.5.6 FIT-Fuel Ignition Tester

Gemäß DIN EN 590 [4] können für die Bestimmung der Cetanzahl drei alternative, nichtmotorische Prüfverfahren herangezogen werden. Da diese Prüfverfahren für diese Arbeit nicht relevant sind, werden sie nur der Vollständigkeit halber angeführt.

Im Wesentlichen wird dabei der Kraftstoff in eine mit synthetischer Luft gefüllte und in Bezug auf Druck und Temperatur vorkonditionierte Brennkammer eingespritzt, die Zündverzögerungszeit gemessen und mit Referenzkraftstoffen verglichen [33].

Während im Versuch an der Verbrennungsbombe der Kraftstoff in ein ruhendes Medium eingespritzt wird, herrscht im Motor durch die Kolbenbewegung eine Luftströmung, die die Zerstäubung beschleunigt. Die Ladungsbewegung verringert somit die physikalische Zündverzögerungszeit, was einen Vergleich der beiden Prüfverfahren nur bedingt ermöglicht [17, 33].

Der Vorteil von Messungen mit einem sogenannten Konstantvolumen-Tester liegt darin, dass im Falle einer Parametervariation jeder Parameter einzeln angepasst werden kann und keine Rückkoppelwirkungen auf die restlichen Parameter erfolgt [18]. Ferner benötigen diese vollautomatisierten Messungen nur eine Kraftstoffmenge von 0,05 l je Kraftstoffprobe für die Bestimmung der Cetanzahl [6].

3 Prüfstands Aufbau und Sensorik

Die Einstellungen für eine normgerechte Messung erfolgt an beiden Motoren mithilfe des Originalsystems. Für eine Auswertung innermotorischer Parameter, sowie Temperaturen, Luftverhältnis und Ähnlichem, wurden die beiden Motoren für derartige Messungen erweitert.

3.1 CFR-Prüfmotor

Das Originalsystem bestehend aus Nadelhubgeber an der Einspritzdüse, Verbrennungsgeber in der Vorkammer, sowie zweier Positionsgeber an der Schwungscheibe für die Kalibrierung der Messeinheit, wurde beibehalten. Allerdings wurden die Signale abgegriffen und ebenfalls dem Indiziersystem zugeführt.

Für eine genaue Untersuchung der Differenzen zwischen den beiden Motoren wurden weitere Parameter aufgezeichnet und analysiert. Die untersuchten Parameter sowie deren Messstellen sind in Abb. 3-1 schematisch dargestellt. In Tab. 3-1 sind die jeweils verwendeten Sensoren am CFR-Motor eingetragen.

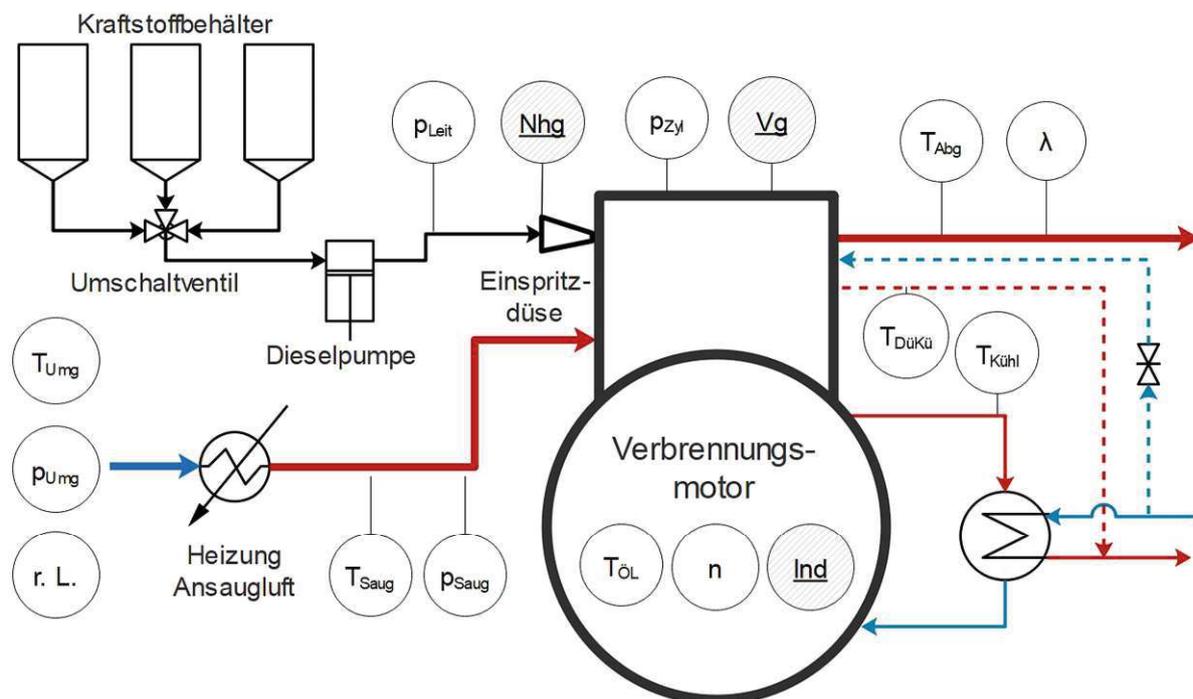


Abb. 3-1: Schematischer Messaufbau am CFR-Motor

Bei den in Abb. 3-1 unterstrichenen und schraffiert dargestellten Messsignalen handelt es sich um jene Sensoren, welche auch das Originalsystem nutzt und an jedem Prüfmotor vorhanden sind. Diese sind zum einen der Nadelhubgeber (Nhg), der Verbrennungsgeber (Vg), sowie die beiden, wie bereits zuvor beschriebenen Induktivgebers (Ind) an der Schwungscheibe des Motors, welche ein Signal bei 13 °KWvOT bzw. genau im OT generieren.

Tab. 3-1: Sensorübersicht am CFR-Motor

	Bezeichnung	Sensor	Einheit
T_{Abg}	Abgastemperatur	Thermoelement Typ K	K
$T_{\text{DüKü}}$	Düsenkühlung	Thermoelement Typ K	K
$T_{\text{Kühl}}$	Kühlwassertemperatur	Thermoelement Typ K	K
T_{Saug}	Ansauglufttemperatur	Thermoelement Typ K	K
T_{Umg}	Umgebungstemperatur	Thermoelement Typ K	K
$T_{\text{Öl}}$	Öltemperatur	Analoges Messgerät	K
p_{Leit}	Leitungsdruck	Kistler Typ 4065A	Pa
p_{Saug}	Saugrohrdruck	Natec P446-K1-A1	Pa
p_{Umg}	Umgebungsdruck	Bosch 0 273 003 210	Pa
p_{Zyl}	Zylinderdruck	Kistler 6041A inkl. zugehörigem Verstärker	Pa
r. L.	Relative Luftfeuchte	Analoggerät	-
λ	Luftverhältnis	ETAS LA3	-
n	Drehzahl	Winkelmarkengeber AVL Scheibe	s^{-1}

3.2 BASF-Prüfmotor

Wie auch am CFR-Motor sind am BASF-Motor zusätzliche Sensoren für eine genaue Auswertung verwendet worden. In [Abb. 3-2](#) sind die jeweiligen Messstellen schematisch zu sehen und in [Tab. 3-2](#) die zugehörigen Sensoren aufgelistet.

Der BASF-Motor wurde freundlicherweise von der Firma ROFA zur Verfügung gestellt.

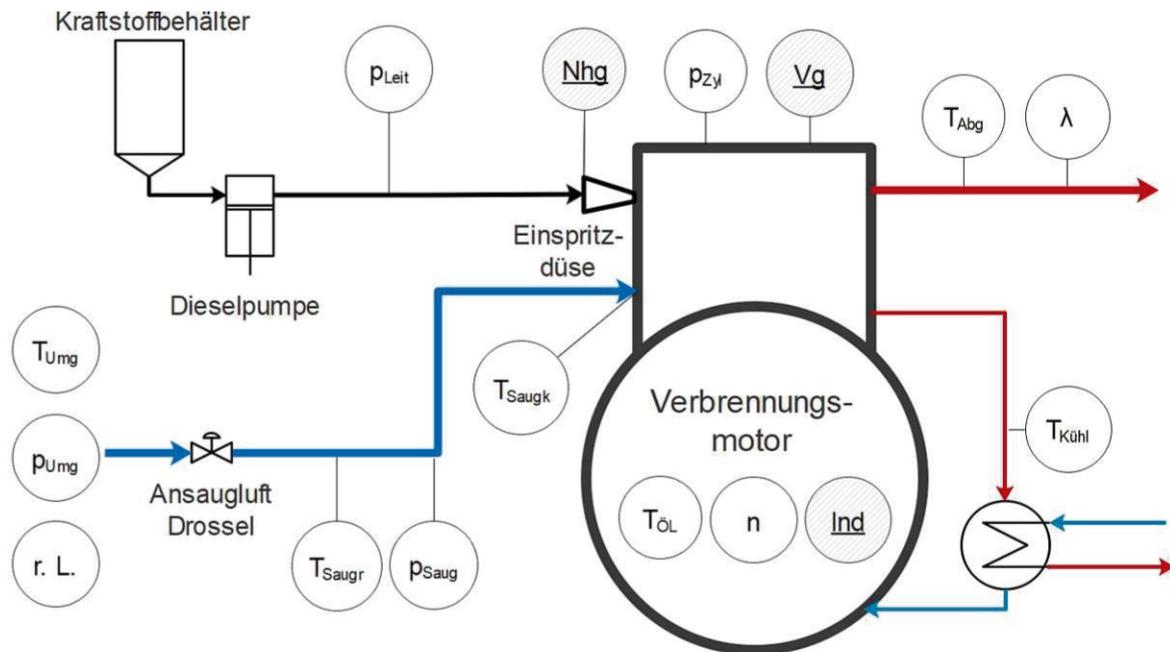


Abb. 3-2: Schematischer Messaufbau am BASF-Motor

Wie beim CFR-Motor zeigen die schraffierten bzw. unterstrichenen Signale in Abb. 3-2 die originalen Sensoren des Prüfmotors, welcher ebenfalls über zwei induktive Sensoren an der Schwungscheibe verfügt.

Tab. 3-2: Sensorübersicht am BASF-Motor

	Bezeichnung	Sensor	Einheit
T_{Abg}	Abgastemperatur	Thermoelement Typ K	K
$T_{Kühl}$	Kühlwassertemperatur	Pt100	K
T_{Saugk}	Saugkanaltemperatur	Thermoelement Typ K	K
T_{Saugr}	Saugrohrtemperatur	Pt100	K
T_{Um}	Umgebungstemperatur	Thermoelement Typ K	K
$T_{Öl}$	Öltemperatur	Pt100	K
p_{Leit}	Leitungsdruck	Kistler Typ 4065A	Pa
p_{Saug}	Saugrohrdruck	Natec P446-K1-A1	Pa
p_{Um}	Umgebungsdruck	Bosch 0 273 003 210	Pa
p_{Zyl}	Zylinderdruck	Kistler 6045A inkl. zugehörigem Verstärker	Pa
r. H.	Relative Luftfeuchte	Analoggerät	-
λ	Luftverhältnis	ETAS LA3	-
n	Winkelmarkengeber	ASM Posiroc PMIS4/PMIR5	s^{-1}

In Abb. 3-3 ist die Lage des Pt100 für die Temperaturentnahme an einem Messflansch am Saugrohr zu sehen. Am selben Bauteil befindet sich zusätzlich der Niederdruckquarz für die Ermittlung des Ansaugdruckes. Weiters kann man im Bereich des Ventildeckels bereits das Kabel für die Temperaturentnahme im Saugkanal erkennen. Abb. 3-4 zeigt den Ansaugkanal im Zylinderkopf bei demontiertem Ansaugrohr, sowie das Thermoelement für die Messungen der Temperatur im Ansaugkanal.



Abb. 3-3: Niederdruckquarz



Abb. 3-4: Thermoelement (Typ K) im Saugkanal

In Abb. 3-5 ist der demontierte Zylinderkopf mit den Anschlüssen, bzw. zum Teil installierten Sensoren abgebildet. Man kann gut erkennen, dass sowohl der Injektor als auch der Indizierquarz im vorderen Bereich des Zylinderkopfes in die Wirbelkammer führen. Eine zuvor bereits durchgeführte Bestimmung des Verdichtungsverhältnisses durch „Auslitern“ ergab einen Wert von 18,5: 1, somit etwas mehr, als der in der Norm angegebene Wert von 18,2:1.

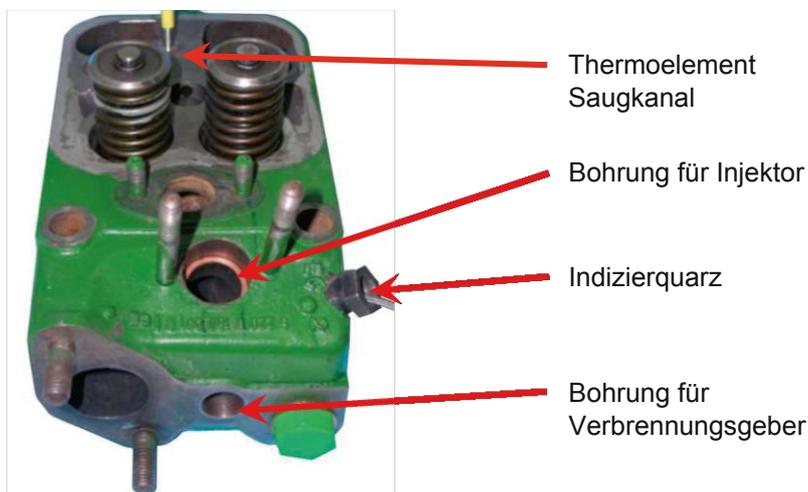


Abb. 3-5: Zylinderkopf am BASF-Motor

3.3 Verwendete Software

Die Messung der Indizierdaten erfolgt an beiden Motoren über das Indiziersystem INDIMODUL der Firma AVL LIST GmbH. Die grafische Darstellung und Abspeicherung der ermittelten Daten wird durch die zugehörige Software am PC AVL INDICOM 2012 realisiert. Die Messung des Zylinderdruckes erfolgt mit Hilfe des Indizierquarzes und einer Auflösung von 0,1 °KW. Eine Berechnung der weiteren Parameter, wie Brennraumtemperatur oder Brennsumsatz, erfolgt systemintern über den Block „Thermodynamik 2“ mit derselben Auflösung. Die Ergebnisse werden sowohl über die Einzeldaten über 200 Zyklen als auch über eine Mittelwertbildung gespeichert.

Durch frühere Analysen der Verbrennung am CFR-Motor wurde das Indiziersystem bereits angepasst und die Einstellungen übernommen.

Für die genauere Analyse und Auswertung der Indizierdaten steht CONCERTO 4.8 der AVL LIST GmbH zur Verfügung.

Für die Aufnahme der nicht kurbelwellenaufgelösten Messwerte (Messwerte außerhalb des Brennraumes), wie Umgebungstemperatur, Ansauglufttemperatur, aber auch Lambdawerte wurde auf das Programm CRIISTAL der Firma SOHATEX zurückgegriffen. Die Benutzeroberfläche von CRIISTAL kann, wie bei INDICOM frei angepasst werden, um die für eine Messung relevanten Werte übersichtlich darzustellen. Weiters können diverse Formeln hinterlegt werden, um bspw. die Cetanzahl direkt zu berechnen. Die Messfrequenz für die Messungen wurde mit 1 Hz festgelegt. Bei den Speicherwerten handelt es sich ausschließlich um Mittelwerte während einer Messung von 30 s. Eine Auswertung der so ermittelten Messergebnisse wird mittels MICROSOFT EXCEL durchgeführt.

3.4 Kraftstoffe

Zu den zu untersuchenden Kraftstoffen zählen neben einem rein fossilen Kraftstoff ohne biogenen Anteil (B0) noch fünf rein biogene Kraftstoffe. Weitere Untersuchungen erfolgten mit Mischungen aus B0 und den biogenen Kraftstoffen, mit einem Mischungsverhältnis von 7 %(V/V) und 30 %(V/V), sowie B0 unter Zugabe von Zündbeschleunigern in unterschiedlichen Konzentrationen. Die Reinstoffe, ausgenommen des Zündbeschleunigers, wurden vorab bei der Firma ASG bzw. durch das *I.M.U* in ihrer Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften untersucht. Die zugehörigen Analysezertifikate finden sich im Anhang.

Bei den untersuchten Kraftstoffen handelt es sich um:

- **B0-Dieselmotorkraftstoff**

Hierbei handelt es sich um einen rein fossilen Dieselmotorkraftstoff der Firma OMV. Um die Anforderung der DIN NORM bezüglich der Cetanzahl zu erfüllen, wurde diesem Kraftstoff bereits Zündbeschleuniger in einer Konzentration von 400 ppm beigegeben, wobei die genaue Bezeichnung unbekannt ist.

- **Zündbeschleuniger**

Bei dem für die Untersuchungen vorliegenden Zündbeschleuniger handelt es sich um 2-Ethylhexylnitrat (Abb. 3-6), dessen Zünd- und Zersetzungstemperatur bei 187 °C bzw. 100 °C liegt. Die kinematische Viskosität liegt bei 1,7 mm²/s bei einer Temperatur von 20 °C [35].

Der Zündbeschleuniger wurde in Konzentrationen von 50, 100, 200, 500, 1000, sowie 2500 ppm dem B0 beigegeben. Die Gesamtkonzentration der Zündbeschleuniger liegt aufgrund der Tatsache, dass B0 bereits Zündbeschleuniger beigegeben wurden noch höher.

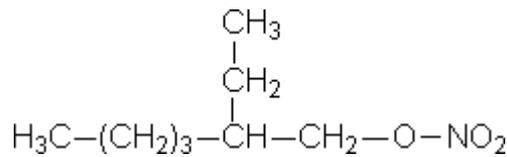


Abb. 3-6: Strukturformel 2-Ethylhexylnitrat [35]

- **Sojamethylester (SME)**

- **FAME - Winterblend (FAME - WB)**

- **FAME - Sommerblend (FAME - SB)**

Sowohl bei FAME-Sommer- als auch Winterblend handelt es sich um Gemische diverser FAME-Kraftstoffe, deren Zusammensetzung hauptsächlich aufgrund der Anwendungstemperaturen bedingt durch deren Kälteeigenschaften variieren.

- **Used Cooking Oil Methyl Ester (UCOME)**

UCOME stellt eine ökologisch interessante Alternative zu den sonst verwendeten Ölen durch den Einsatz von Altspeiseöl dar. Denkbar ist auch die Verwendung von tierischen Fetten, was in Deutschland allerdings verboten ist [3].

- **Rapsmethylester (RME)**

RME zeichnet sich im Vergleich zu anderen FAME aufgrund seiner Fettsäurestruktur durch ein gutes Verbrennungsverhalten, sowie eine hohe Kältestabilität aus [40].

Die Hauptbestandteile aller fünf FAME sind Ölsäure, Linolsäure sowie Palmitinsäure, wie in Abb. 3-7 dargestellt. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen beeinflussen nicht nur die physikalischen Eigenschaften, sondern können, wie bereits erwähnt, auf

die Zünd- und Verbrennungseigenschaften Einfluss nehmen. Die beiden Kraftstoffe SME und UCOME unterscheiden sich hinsichtlich der Mischungsverhältnisse deutlich von den restlichen.

Durch einen Vergleich der Zusammensetzung von FAME - Sommerblend und FAME - Winterblend, kann darauf geschlossen werden, dass diese zu einem Großteil aus RME bestehen.

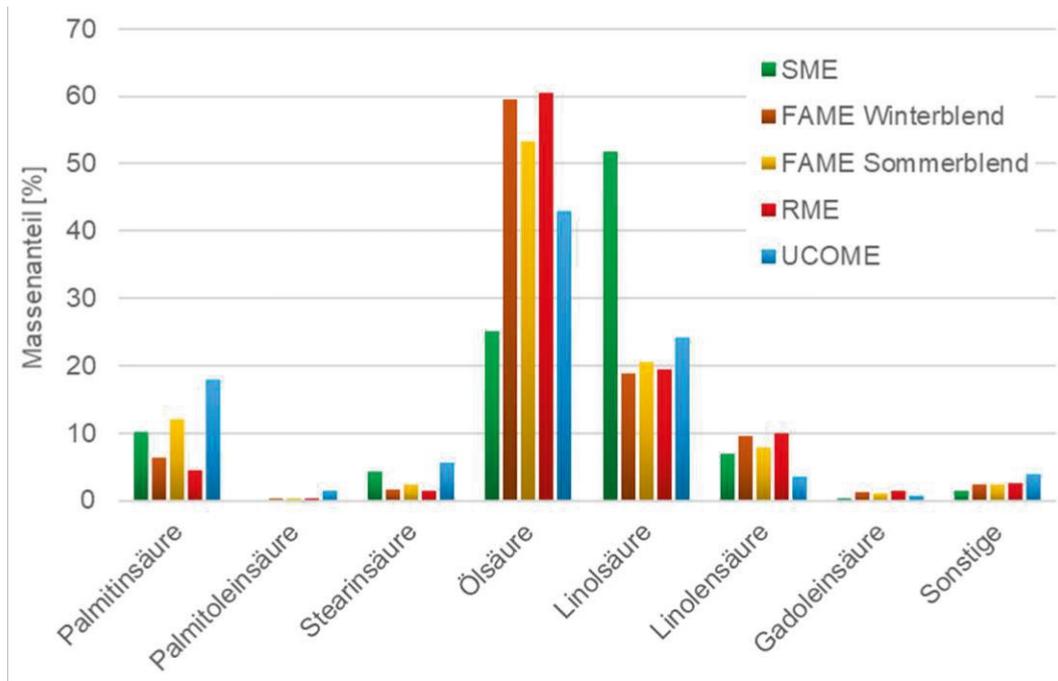


Abb. 3-7: Gravimetrische Zusammensetzung der FAME-Kraftstoffe [A3, A4, A5, A6, A7]

Tab. 3-3 zeigt die Dichte und kinematische Viskosität (physikalische Eigenschaften) der untersuchten Kraftstoffe. Während die Unterschiede der Dichte relativ gering sind, sind Differenzen der kinematischen Viskosität, vor allem zwischen den FAME-Kraftstoffen und dem B0 deutlich zu erkennen.

Tab. 3-3: Dichte und kinematische Viskosität der Kraftstoffe [A2, A3, A4, A5, A6, A7]

Kennwert	Einheit	B0	SME	FAME - WB	FAME - SB	RME	UCOME
Dichte ¹⁾	ρ g/cm ³	0,84	0,89	0,88	0,88	0,88	0,88
Viskosität ²⁾	ν mm ² /s	2,6	4,2	4,4	4,4	4,4	4,7

Bei ¹⁾ 15 °C, ²⁾ 40 °C

4 Messungen und Messergebnisse

Dieses Kapitel beschäftigt sich in erster Linie mit den Versuchen, die am BASF- und CFR-Motor gefahren wurden. In einem ersten Schritt wird der Messablauf beschrieben. Aufbauend auf diesem Versuchsplan werden die gewonnenen Ergebnisse präsentiert und in weiterer Folge diskutiert.

4.1 Messablauf

Der Messablauf an beiden Motoren erfolgt jeweils nach demselben Schema. Vor Beginn der ersten Messungen wurden beide Motoren entsprechend der jeweiligen Normen und Betriebshandbücher bzw. nach eigenem Ermessen auch länger als vorgeschrieben warmgefahren. Der Grund für die längere Warmlaufphase wird in Kapitel 4.3 genauer erläutert.

Im zweiten Schritt erfolgt eine Überprüfung des Motors, durch Bestimmung der Cetanzahl des IFA-Diesels, welche aus dem Datenblatt bekannt ist. Eine derartige Überprüfung ist zwar nicht vorgeschrieben, kann aber Abweichungen oder eventuelle Störungen am Motor frühzeitig aufdecken, sodass diese schnell behoben werden können.

Im Anschluss erfolgen die eigentlichen Messungen der Probenkraftstoffe nach der jeweiligen Norm. Zumindest einmal am Tag zwischen den Proben oder am Ende erfolgte eine weitere Vermessung des IFA-Diesels für eine kontinuierliche Kontrolle.

4.2 Ergebnisse Cetanzahlen

Der Aufbau dieses Abschnittes wird gemäß der Versuchsreihenfolge bestimmt. In einem ersten Schritt wurden die Cetanzahlen B7 und B30 analysiert, anschließend erst die reinen FAME-Kraftstoffe. Abschließend werden dann die Ergebnisse der Zündbeschleuniger aufgezeigt.

4.2.1 FAME 7%

Die sich am CFR-Motor einstellenden Cetanzahlen für die Kraftstoffmischungen aus B0 mit 7 % FAME-Anteil, wie sie auf europäischer Ebene an Tankstellen entsprechend DIN 509 [4] bezogen werden können, sind in [Abb. 4-1](#) dargestellt. Man kann trotz der geringen Mengen an beigemischtem FAME bereits eine Auswirkung erkennen. Die höchste Cetanzahl weist jene Mischung mit FAME - Sommerblend gefolgt von UCOME und FAME - Winterblend auf. Weiters eingetragen sind die Streuungen der jeweiligen Kraftstoffe, sowie die Reproduzierbarkeit bzw. Vergleichbarkeit für den jeweiligen Motor.

Am CFR-Motor ist durch die Norm die Wiederholbarkeitsgrenze mit 0,9 CZ und Reproduzierbarkeitsgrenze mit 4,3 CZ bei einer durchschnittlichen Cetanzahl von 52 CZ gegeben [30].

Für ein aussagekräftiges Ergebnis erfolgt eine mehrmalige Wiederholung der Versuche. Die Anzahl der durchgeführten Messungen beläuft sich auf mind. acht je Kraftstoff und Cetanzahl.

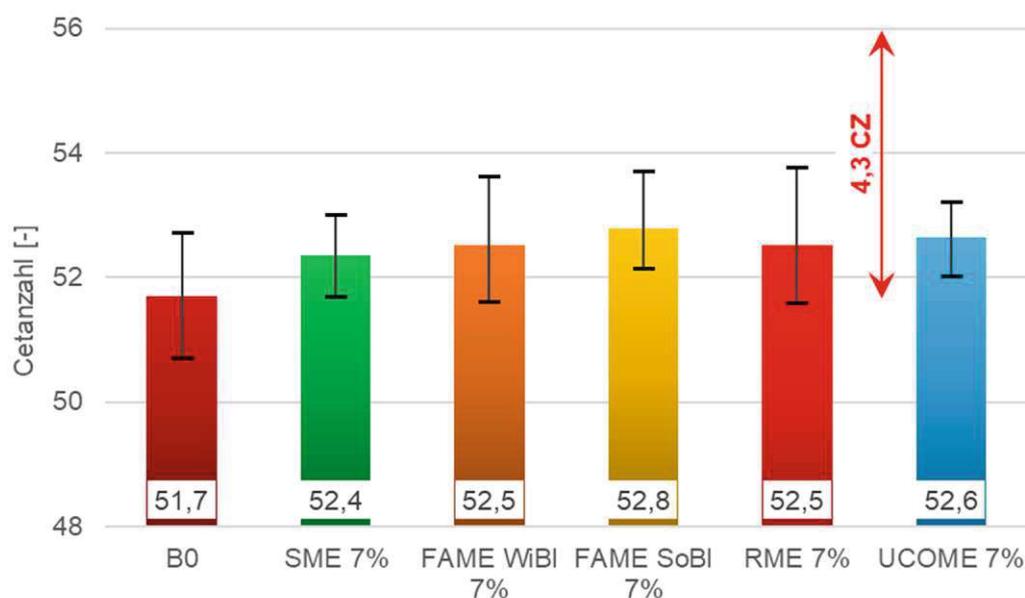


Abb. 4-1: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die B7-Kraftstoffe

Die Wiederholbarkeit liegt am BASF-Motor bei Kraftstoffen im Bereich von 47 CZ bis 61 CZ bei 0,8 CZ. Die Vergleichbarkeit im selben Bereich beträgt 1,9 CZ [31].

Während die Wiederholbarkeit der beiden Motoren relativ ähnlich ist, liegt die Toleranz der Reproduzierbarkeit am CFR-Motor je nach Cetanzahl um mindestens Faktor zwei höher, was bedeutet, dass der BASF bezogen auf diese Werte eine höhere Genauigkeit aufweist als der CFR.

In [Abb. 4-2](#) sind die am BASF-Prüfmotor bestimmten Cetanzahlen zu sehen. Diese zeigen bereits leichte Abweichungen zu jenen gemessen am CFR-Motor. Ein Vergleich der [Abb. 4-2](#) und [Abb. 4-1](#) zeigt, dass die gemessenen Cetanzahlen der beiden Motoren eine Differenz von 0,2 CZ bis zu 0,8 CZ aufweisen, je nach Kraftstoff. Die größten Differenzen sind bei FAME – Winterblend und RME aufgetreten.

Eine Gegenüberstellung der B7, B30 und reinen FAME-Kraftstoffe erfolgt in Kapitel 4.2.3.

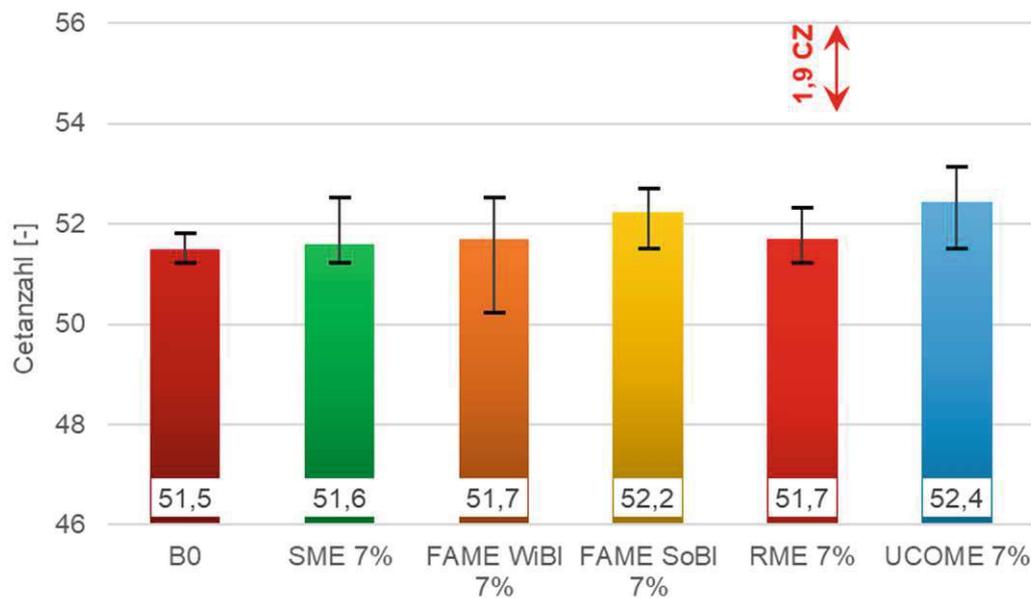


Abb. 4-2: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die B7-Kraftstoffe

Am BASF konnte am FAME – Winterblend eine Messung identifiziert werden, die nicht innerhalb der Reproduzierbarkeit liegt. Alle weiteren Messungen sind innerhalb dieser Toleranz.

4.2.2 FAME 30%

Abb. 4-3 zeigt die Cetanzahlen am CFR-Motor für die B30 Kraftstoffe. Man kann erkennen, dass mit steigendem biogenem Anteil die Cetanzahlen entsprechend ansteigen. Es kann festgehalten werden, dass die Cetanzahl aller Kraftstoffe um annäherungsweise denselben Faktor ansteigen, lediglich der FAME - Winterblend und UCOME steigen etwas mehr an. Die Messungen der Kraftstoffe erfolgten zumindest sechs Mal, wobei die Grenzen der Reproduzierbarkeit, wie an den Streuungen zu erkennen ist, nie überschritten wurden.

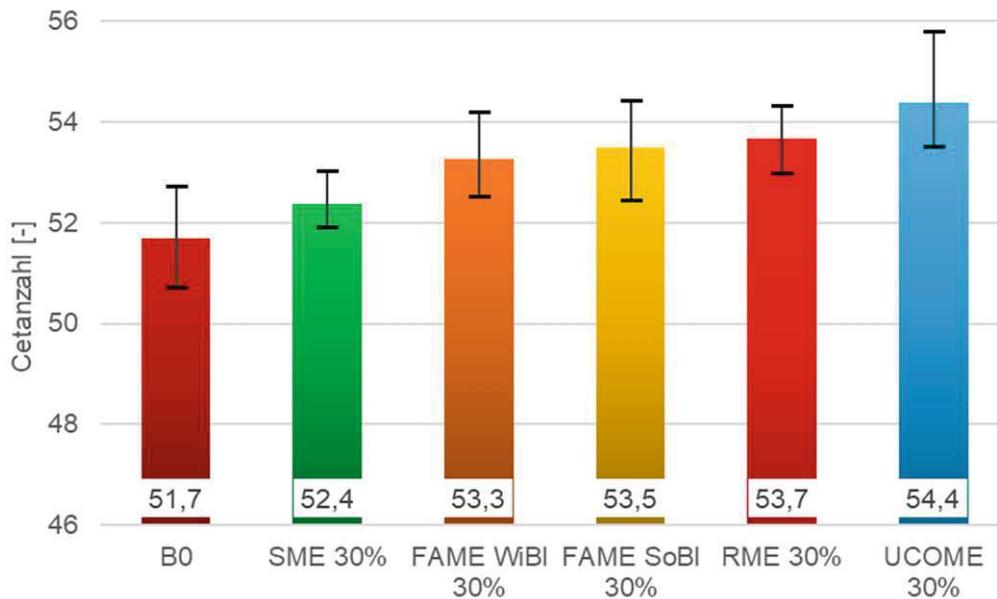


Abb. 4-3: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die B30-Kraftstoffe

Entsprechend der Entwicklung der Cetanzahl von B7 auf B30 am CFR-Motor steigen auch die am BASF-Motor ermittelten Cetanzahlen an. In [Abb. 4-4](#) sind die gemessenen Cetanzahlen für den BASF eingetragen, wobei auffällt, dass die Zündwilligkeit von UCOME sehr deutlich ansteigt. Weiters kann man feststellen, dass die Kraftstoffmischungen mit FAME - Winterblend und UCOME am BASF höher bewertet werden. Der Messumfang belief sich ebenfalls auf min. sechs Messungen pro Kraftstoff.

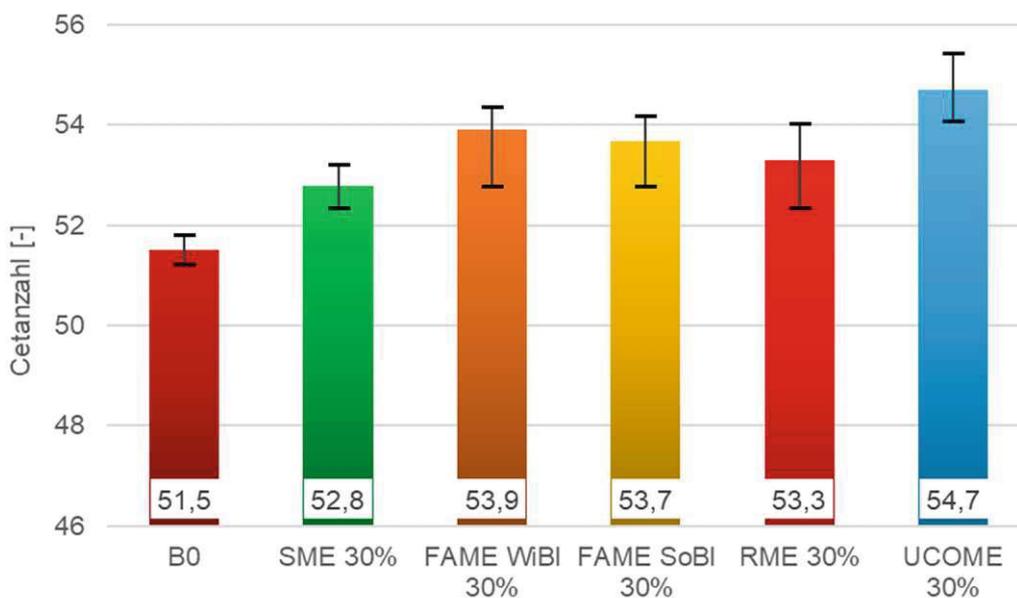


Abb. 4-4: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die B30-Kraftstoffe

4.2.3 FAME Reinstoffe

Aufgrund der begrenzten Menge an FAME Kraftstoffen erfolgte die Bestimmung der Cetanzahl im Vergleich zu den vorherigen Messungen weniger häufig. Insgesamt wurde jeder der fünf Kraftstoffe viermal pro Motor vermessen. In [Abb. 4-5](#) sind die Messergebnisse für den CFR-Motor abgebildet.

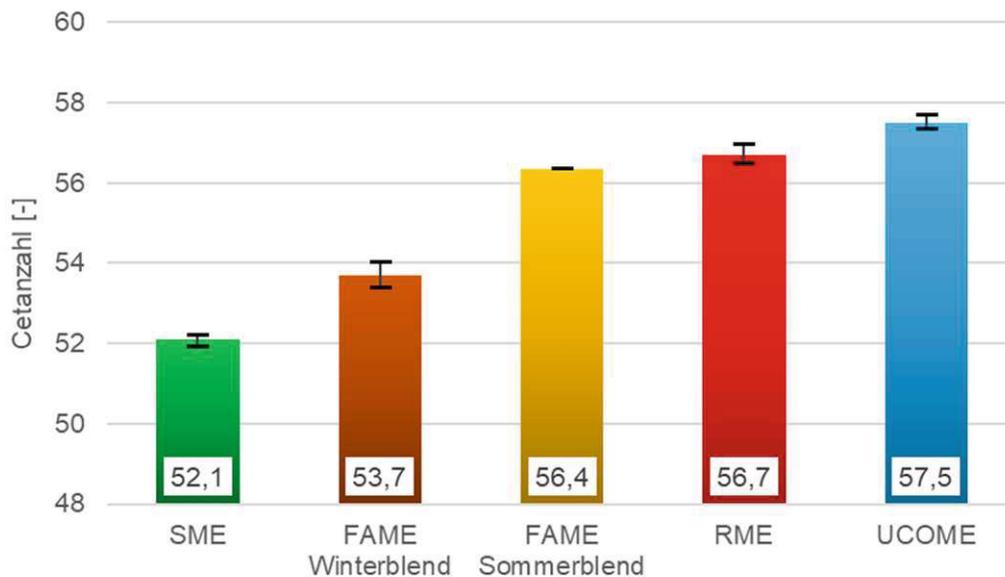


Abb. 4-5: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die B100-Kraftstoffe

Man erkennt, dass die Kraftstoffe untereinander zum Teil deutlich größere Differenzen aufweisen, als jene der Kraftstoffmischungen mit B0. Wie aus den vorangegangenen Messungen zu erwarten war, zeigt sich bei UCOME die höchste Zündwilligkeit, während jene von SME um fünf Cetanzahlen geringer liegt.

[Abb. 4-6](#) zeigt die mit dem BASF-Motor ermittelten Cetanzahlen der FAME-Kraftstoffe mit dem Schwankungsbereich der Messungen. Weiters ist zu sehen, dass SME etwa auf demselben Niveau wie RME liegt, wohingegen der CFR zwischen diesen Kraftstoffen eine Differenz von ca. 4,5 CZ aufzeigt.

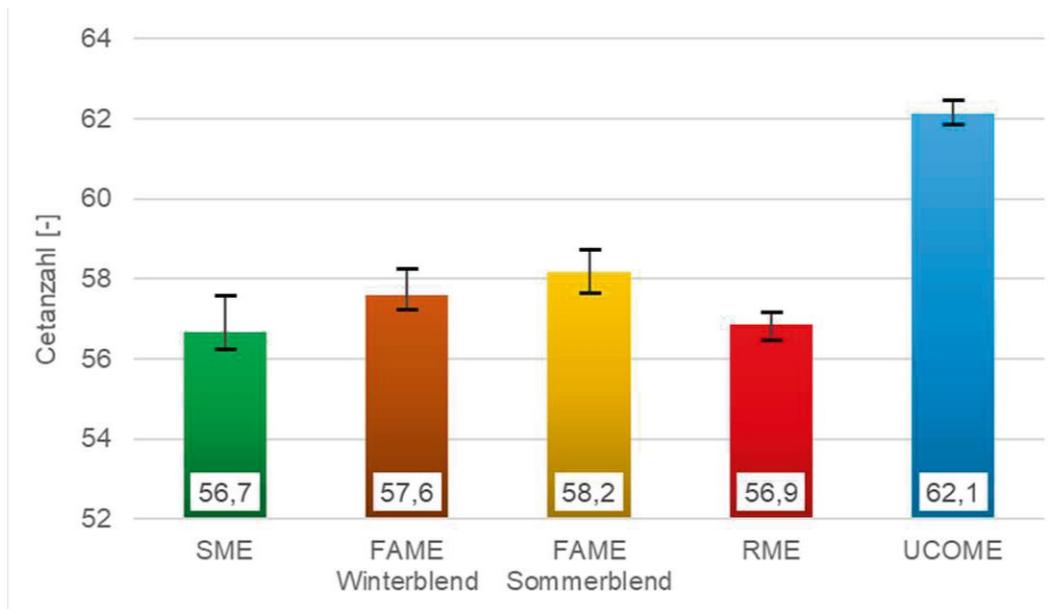


Abb. 4-6: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die B100-Kraftstoffe

Um die Differenzen der unterschiedlichen Bewertungen besser erkennen zu können, sind in Abb. 4-7 die durch die Untersuchungen beobachteten Cetanzahlen der FAME in einem Diagramm gegenübergestellt. Es kann festgehalten werden, dass die Bewertung der Cetanzahlen der FAME-Kraftstoffe am BASF zum Teil deutlich höher ausfallen als am CFR-Motor. Lediglich RME zeigt an beiden Motoren eine ähnliche Zündwilligkeit.

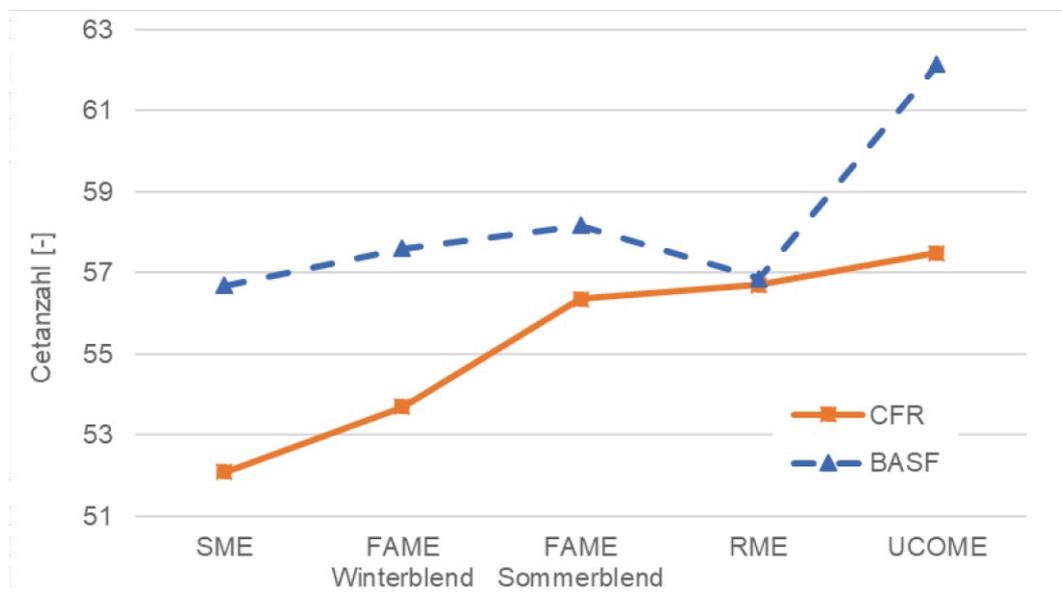


Abb. 4-7: Gegenüberstellung der Cetanzahlen der B100-Kraftstoffe gemessen am CFR und BASF

Abb. 4-8 zeigt die ermittelten mittleren Cetanzahlen, sowohl für die FAME-Mischungen als auch die reinen FAME des BASF-Motors über den CFR. Die beiden roten

strichpunktieren Linien stellen die zum Teil extrapolierten Grenzen der Reproduzierbarkeit des CFR-Prüfmotors entsprechend [30] dar. Somit sind alle Ergebnisse, die innerhalb dieses Bereiches liegen, zumindest aus Sicht des CFR-Prüfmotors als gültig zu werten und als angestrebten Wert für den BASF zu sehen.

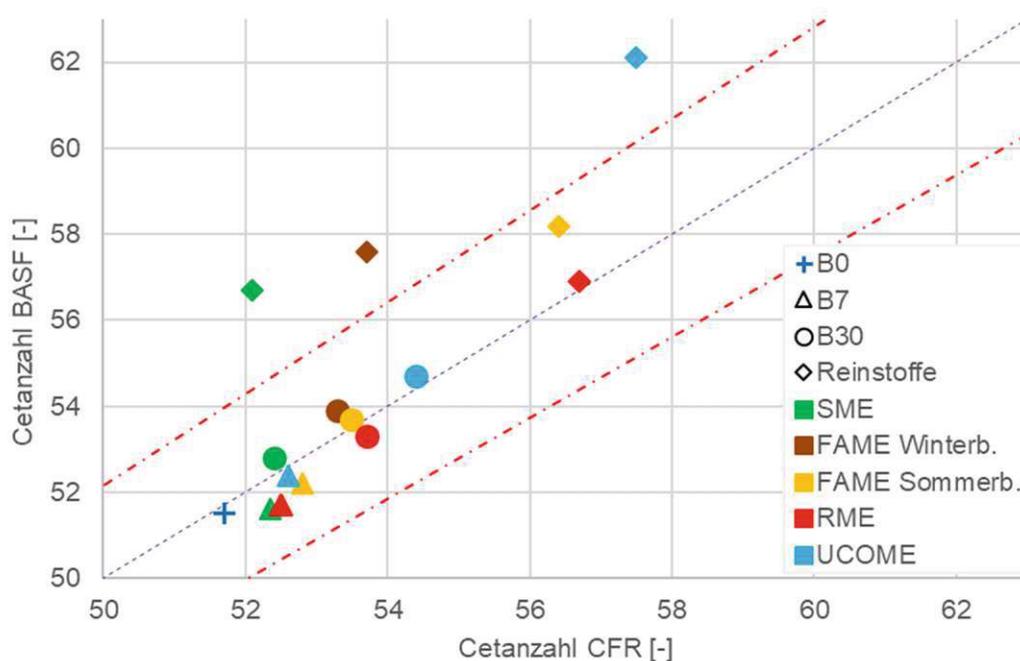


Abb. 4-8: Cetanzahl der FAME-Kraftstoffe aus den Messungen mittels CFR und BASF

Mit den vorliegenden Messergebnissen konnte gezeigt werden, dass die Bewertung der Cetanzahl mit konventionellen Dieselmotoren, mit einem biogenen Anteil von bis zu 7 % zwischen den beiden Motoren nur zu geringen Differenzen führt. Die am BASF ermittelten Werte liegen tiefer als jene des CFR. Mit steigendem Anteil an FAME steigt die Cetanzahl an beiden Motoren an. Die höchste Zündwilligkeit zeigen die B100, wobei die Messwerte zumeist deutliche Abweichung aufzeigen und zum Teil nicht mehr innerhalb der Reproduzierbarkeitsgrenzen des CFR geschweige des BASF zu liegen kommen.

Die geringste Differenz zeigte sich bei RME, während die größten Unterschiede bei SME, UCOME und dem FAME -Winterblend auftraten.

Die unterschiedlichen Cetanzahlen der jeweiligen Kraftstoffe kann zum Teil durch die in Kapitel 3.4 aufgezeigten, teilweise recht unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen der FAME erklärt werden. Wie es scheint weist Linolsäure, die Hauptkomponente von SME, eine geringere Zündwilligkeit gegenüber Ölsäure auf, den Hauptbestandteil der übrigen Kraftstoffe.

4.2.4 Alterung

Die Oxidationsstabilität ist eine Kenngröße von Kraftstoffen, die die Stabilität einer Probe gegenüber Oxidationsvorgängen kennzeichnet und Rückschlüsse auf die Lagerstabilität erlaubt. Die Lagerbeständigkeit ist unter anderem abhängig von der Temperatur, dem Licht, sowie dem Vorhandensein von Fremdstoffen mit katalytischer Wirkung. Diese initiieren oder beschleunigen Oxidationsvorgänge, was zu einer Verminderung der Qualität des Kraftstoffes führt. Kraftstoffe mit einem höheren Anteil an ungesättigten Fettsäuren, wie FAME, sind besonders anfällig für einen Alterungsprozess, wobei die Oxidation durch Zugabe von Antioxidantien gehemmt werden kann [41, 42].

Abbauprodukte der Kraftstoffalterung können kurzkettige Carbonsäuren, Aldehyde, Ketone und Alkohole sein. Diese beeinflussen die Korrosivität des Kraftstoffs negativ. Es können aber auch hochmolekulare Moleküle (Oligomere) entstehen, die zu Verstopfungen der Filter und Leitungen, Schäden am Einspritzsystem und schlechten Emissionswerten führen [3].

Für die Beurteilung der Alterung eines FAME-Kraftstoffes können einige Größen herangezogen werden. Zum einen die Oxidationsstabilität, die mit steigender Alterung abnimmt. Weiters die Neutralisationszahl, die Auskunft über den Gehalt saurer Bestandteile einer Probe gibt, wobei diese bei einer Kraftstoffalterung höher ausfällt. Eine weitere Größe für die Bestimmung der Alterung ist die Peroxidzahl. Sie gibt die Menge Sauerstoff an, die chemisch als Peroxid bzw. Hydroperoxid gebunden ist [41].

Im Verlauf der Messungen konnte festgestellt werden, dass es vermutlich durch einen Alterungsprozess der FAME-Kraftstoffe über die Zeit zu einer Änderung deren Eigenschaften kam. Nach Anbruch der Originalkanister wurden diese mit B0 vermischt für die 7 % und 30 % Mischungen, verschlossen und bei Raumtemperatur für eine längere Zeit gelagert. Die ersten Messungen der Reinstoffe erfolgten nach ungefähr fünf Monaten.

Während dieser Zeitspanne veränderten sich die Cetanzahlen der Kraftstoffe, was sich durch die Messungen feststellen ließ. Die in [Abb. 4-9](#) aufgezeigten Werte wurden mithilfe des BASF-Prüfmotors ermittelt. Die Cetanzahl der bereits zuvor geöffneten Behälter werden als „gealtert“ bezeichnet. Bei den als „nicht gealterten“ gekennzeichneten Kraftstoffen handelt es sich um idente Kraftstoffe aus einem zweiten, nicht angebrochenen Behälter derselben Charge. Wie die Versuche zeigten, stellt die Lagerung einen zum Teil deutlichen Einfluss auf die ermittelte Cetanzahl der Kraftstoffe dar. Die Kraftstoffe wiesen im „gealterten“ Zustand eine deutlich höhere Cetanzahl um bis zu ca. 6 CZ auf, lediglich bei UCOME trat kaum eine Veränderung in den Messungen auf. Eine höhere Cetanzahl der „gealterten“ Kraftstoffe konnten ebenfalls am CFR-Motor nachgewiesen werden. Um diesen Auswirkungen

entgegenzuwirken, wurden die, für die folgenden Versuche benötigten Kraftstoffbehälter, nach Verwendung mit Argon geflutet. Die Wahl fiel auf Argon, da dessen Dichte deutlich höher liegt als jene von Stickstoff, die jener der Luft sehr ähnlich ist. Weiters handelt es sich um ein Edelgas (Inertgas), wodurch sich eine chemische Reaktion ausschließen lässt.

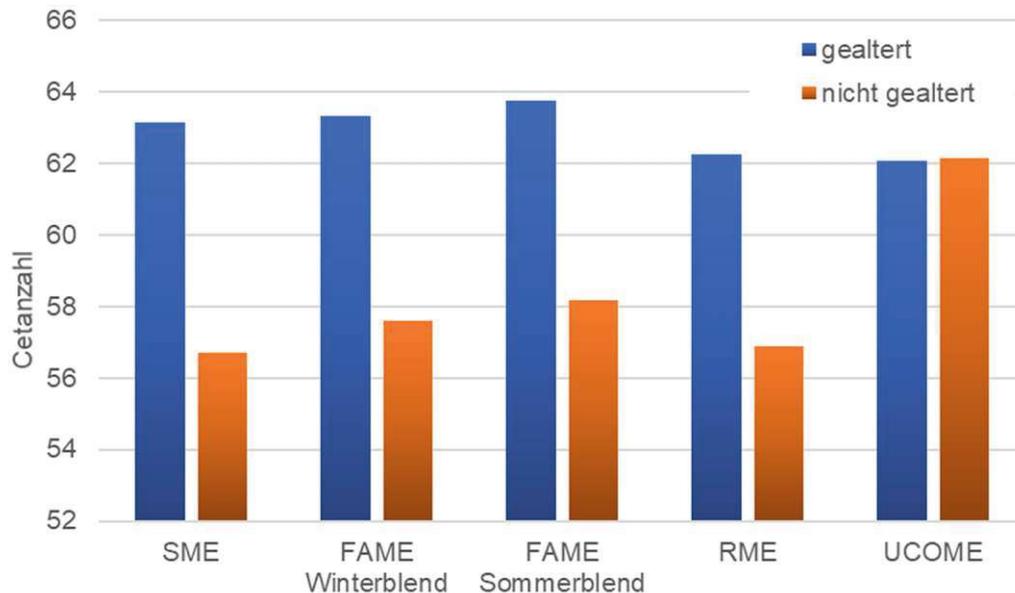


Abb. 4-9: Auswirkung auf die Cetanzahl aufgrund der Lagerung der FAME-Reinstoffe, gemessen nach ca. fünf Monaten am BASF

Die in Kapitel 4.2.3 dargestellten Ergebnisse sind allesamt mit den nichtgealterten Kraftstoffen ermittelt worden. Ein Einfluss auf die 7- und 30 % Mischungen konnte durch Vergleiche früherer und späterer Messungen nicht festgestellt werden.

Ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Cetanzahlen und der Oxidationsstabilität bzw. der Peroxidzahl konnte in den Ergebnissen nicht festgestellt werden.

4.2.5 Zündbeschleuniger

Die in [Abb. 4-10](#) dargestellten Cetanzahlen wurden mit dem CFR-Prüfmotor ermittelt. Wie zu erwarten, stieg die Cetanzahl des Basiskraftstoffes B0 mit zunehmender Konzentration an. Die Zugabe relativ geringer Mengen führen bereits zu deutlichen Steigerungen der Cetanzahl. Es konnte festgestellt werden, dass die Cetanzahl durch die Zugabe von 100 mg/kg Zündbeschleuniger bereits um mehr als eine Einheit erhöht wurde.

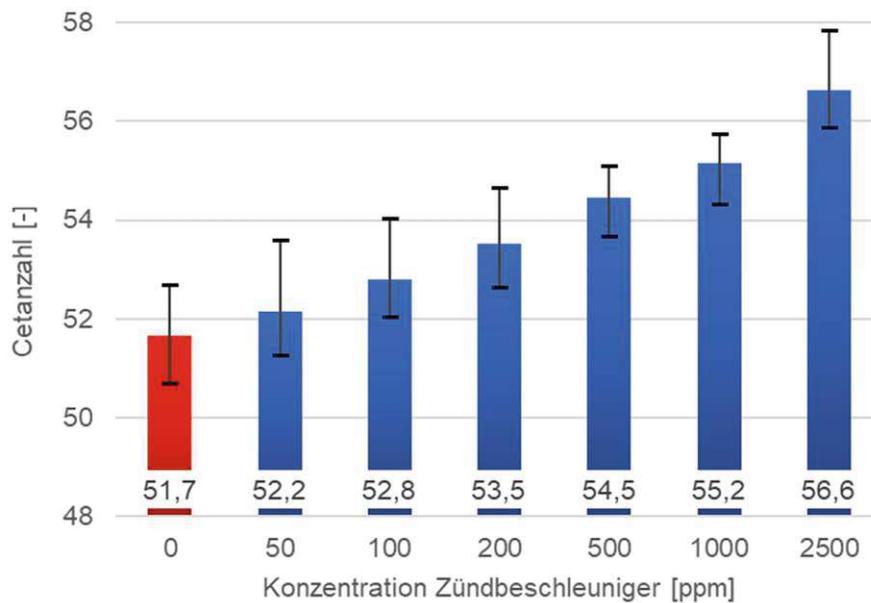


Abb. 4-10: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die Zündbeschleuniger

Anhand von Abb. 4-11 wird deutlich, dass die ermittelten Cetanzahlen, gemessen am BASF, mit steigender Konzentration ebenfalls ansteigen. Es zeigt sich, dass die Mehrheit der ermittelten Werte niedriger liegen als am CFR-Motor. Damit konnte gezeigt werden, dass der CFR merklich sensitiver auf vorhandene Zündbeschleuniger reagiert. Für eine Steigerung der Cetanzahl um eine Einheit, ist die doppelte Menge (200 ppm) an Zündbeschleunigern erforderlich.

Weiters ist auffällig, dass die Spreizung der ermittelten Werte am BASF-Motor im Vergleich zum CFR deutlich geringer ist, wobei alle Werte innerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegen.

Ein möglicher Grund für den Abfall der Cetanzahl von 100 ppm auf 200 ppm in Abb. 4-11 kann die höhere Spreizung bei letztgenannten darstellen. Alle Versuche wurden drei Mal wiederholt, weshalb sich eine zu niedrige bzw. hohe Bewertung erheblich auf den Mittelwert auswirkt. Weiters sind die Differenzen der Cetanzahlen in diesem Bereich sehr gering, sodass auch Messungenauigkeiten zu diesen Abweichungen führen können.

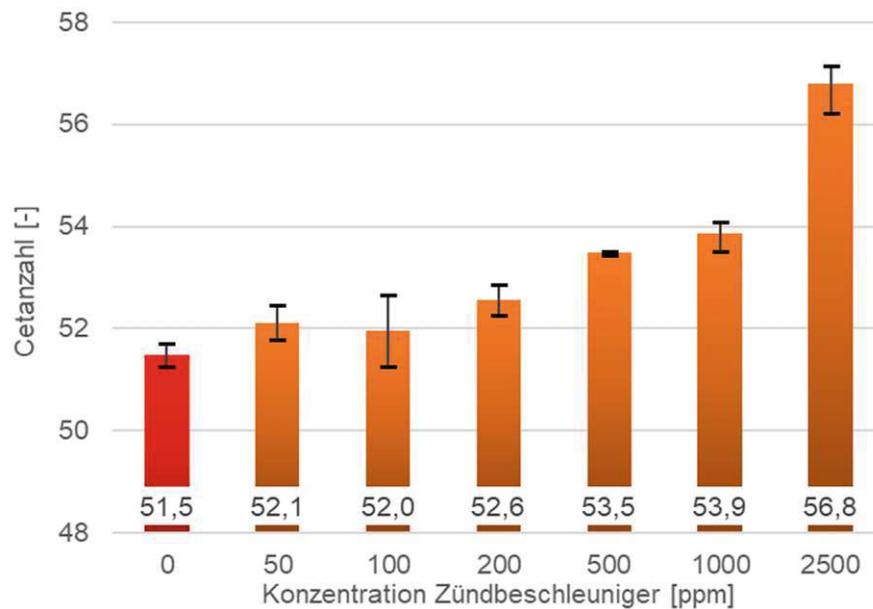


Abb. 4-11: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die Zündbeschleuniger

Die Differenzen zwischen CFR und BASF werden anhand [Abb. 4-12](#) noch deutlicher. Am CFR-Motor zeigte sich ein relativ konstanter Anstieg der Cetanzahl im Vergleich zum BASF wobei bei sehr hohen Konzentrationen (2500 ppm) der BASF die Cetanzahl sehr ähnlich bzw. kaum merkbar höher bewertet als der CFR. Eine weitere Erklärung für die niedrigere Bewertung des B0 am BASF ist, neben möglichen Messungenauigkeiten, der bereits in B0 enthaltene Zündbeschleuniger, da der CFR-Motor, wie gezeigt, auf geringeren Zündbeschleunigerkonzentrationen sensibler reagiert.

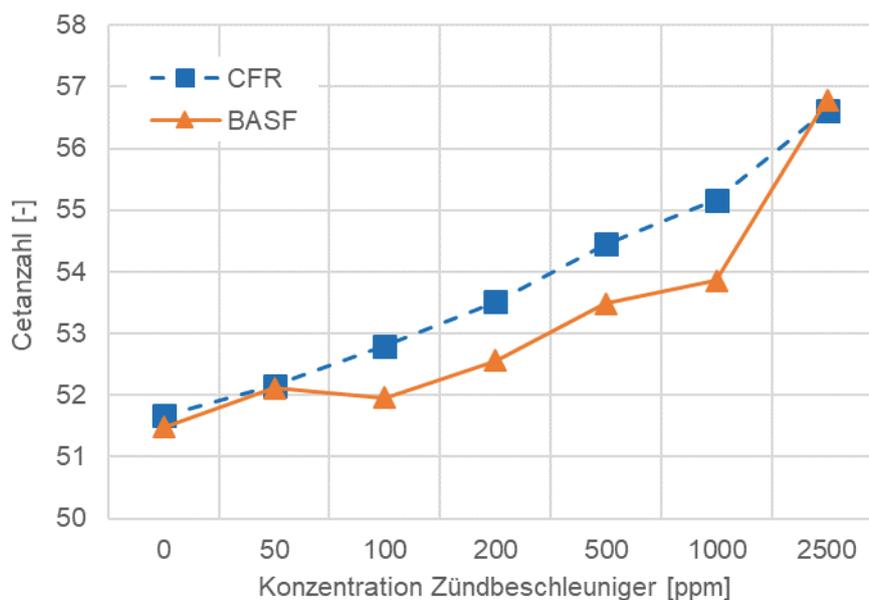


Abb. 4-12: Gegenüberstellung der Cetanzahlen der Zündbeschleuniger gemessen am CFR und BASF

Die Differenzen zwischen den beiden Motoren sind aber weitaus nicht so gravierend, wie in reinem FAME-Betrieb und liegen im Bereich von maximal 1,3 CZ und somit im Bereich der Messgenauigkeit der beiden Motoren.

4.3 Ansauglufttemperaturverlauf

Auf Grund der zum Teil großen Schwankungen zwischen den beiden Motoren galt es, die möglichen Einflussgrößen für diese Auswirkungen zu erörtern. Die Diagramme in [Abb. 4-13](#) und [Abb. 4-14](#) zeigen den typischen Verlauf der Umgebungs- und Ansauglufttemperatur an einem Messtag, aufgetragen über die Messdauer, nach der Warmlaufphase. Die Warmlaufphase am CFR-Motor betrug dabei etwas mehr als 1 h, während am BASF dafür knapp 2 h eingeplant wurden. Für den CFR-Motor ([Abb. 4-13](#)) sind die Umgebungstemperatur, die Ansauglufttemperatur im Saugrohr, sowie der zugehörige Toleranzbereich ($66 \pm 0.5 \text{ °C}$) eingezeichnet.

Am BASF-Motor ([Abb. 4-14](#)) hingegen sind die Temperaturen Umgebungstemperatur, Saugrohr und Saugkanal entsprechend Kapitel 3.2 aufgetragen.

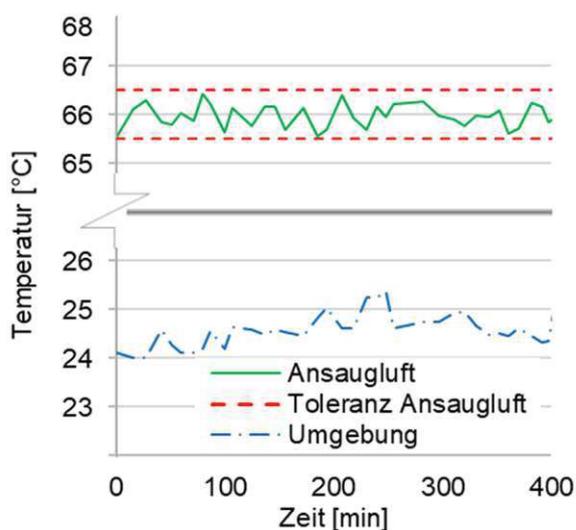


Abb. 4-13: Ansaugluft- und Umgebungstemperaturverlauf am CFR-Motor nach Warmlaufphase

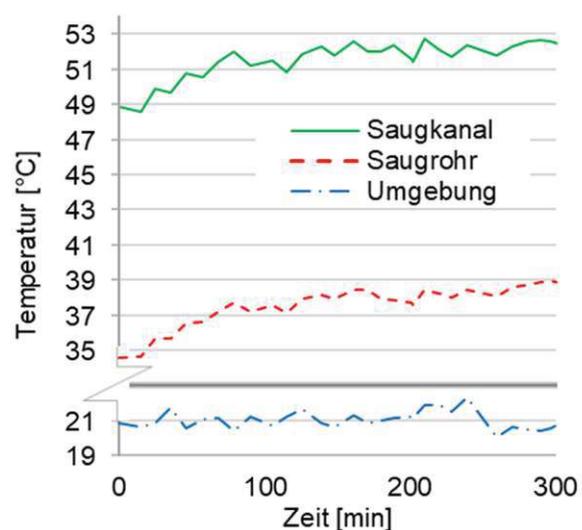


Abb. 4-14: Ansaugluft- und Umgebungstemperaturverlauf am BASF-Motor nach Warmlaufphase

In [Abb. 4-13](#) kann man sehen, dass die Ansauglufttemperatur aufgrund der Vorwärmung der Ansaugluft zu jedem Zeitpunkt innerhalb des zulässigen Schwankungsbereiches liegt.

Im Vergleich dazu kann man am BASF-Motor, trotz der längeren Warmlaufphase erkennen, dass die Ansauglufttemperatur während der nächsten 5 h kontinuierlich ansteigt. Die Temperatur ändert sich in dieser Zeitspanne von 49 °C auf ca. 53 °C . Ein möglicher Grund für den stetigen Temperaturanstieg ist die Wärmeleitung vom Motor

in Richtung des Ansaugflansches direkt am Beruhigungsbehälter. Da das Ansaugrohr sehr dickwandig ausgeführt ist, erfolgt die Aufheizung relativ langsam. Für eine annäherungsweise konstante Ansauglufttemperatur sollte der Motor weitere 150 min warmgefahren werden, zuzüglich der Warmlaufphase vor den Messungen von knapp zwei Stunden. Weiters ist zu sehen, dass die Temperaturdifferenz zwischen dem Saugrohr und dem Saugkanal im Zylinderkopf nahezu konstant ist, was darauf hindeutet, dass der Zylinderkopf bereits die Betriebstemperatur erreicht hat.

Abb. 4-15 zeigt den Verlauf der Umgebungs- und Ansauglufttemperatur des BASF-Motors ab dem Startvorgang. Zusätzlich sind in diesem Diagramm die notwendigen Luftmengen für einen Zündverzug von 20 °KW über die ersten 110 min in 5 min Schritten eingezeichnet. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Vermessung von Kraftstoffen. Man kann erkennen, dass beim Start aufgrund der geringen Temperaturen im Brennraum deutlich höhere Luftmengen für die Einhaltung der Zündverzugszeit erforderlich sind als im weiteren Verlauf. Im Vergleich zu Abb. 4-14 liegt die Umgebungstemperatur um ca. 7 °C höher, was sich entsprechend auf die Temperatur der Ansaugluft auszuwirken scheint. Wie zuvor bereits beschrieben ist die Differenz zwischen Ansaugrohr und Ansaugkanal ab einer Laufzeit von 60 min relativ konstant ($12,5 \pm 0,5$ °C). Vor allem im Bereich der Warmlaufphase ändert sich die Luftmenge entsprechend der Ansauglufttemperatur stark. Lediglich im Zeitraum von 80 min sinkt die Luftmenge rapide ab, um 10 min später über das vorherige Niveau anzusteigen. Eine Ursache für dieses Phänomen konnte auch mithilfe der Indizierdaten nicht ausgemacht werden.

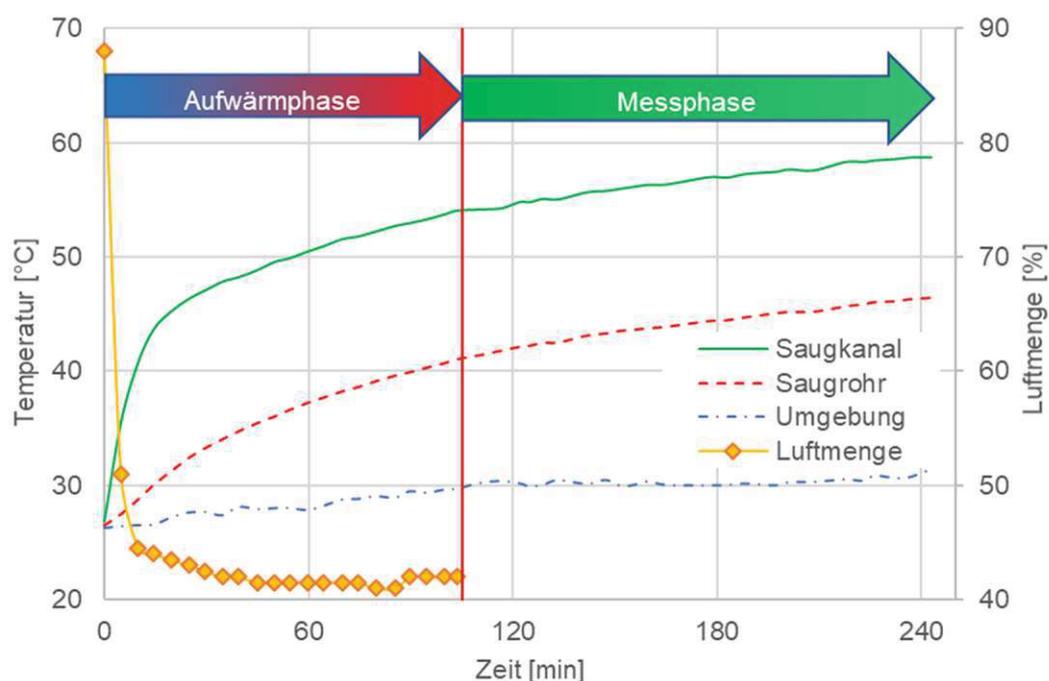


Abb. 4-15: Temperatur und Ansaugluftentwicklung am BASF Motor

Der CFR erreicht die angestrebte Ansauglufttemperatur von 66 °C je nach Heizleistung bereits deutlich früher, allerdings kann bei einer Zeitspanne unter 60 min, wie es die Norm vorschreibt, nicht ausgeschlossen werden, dass der Motor vollkommen temperiert ist, weshalb diese Zeit tunlichst eingehalten werden sollte.

4.4 Mögliche Messfehler und Messungenauigkeiten

Laut DIN EN 16906 [31] ist für die Bestimmung der Cetanzahl nach dem BASF-Verfahren von mehr als drei Proben oder im Falle von Routineanalysen eine Kalibrierkurve aus zumindest fünf Referenzkraftstoffen, deren Differenz untereinander nicht mehr als 4 CZ betragen darf, aufzunehmen, welche zweimal in einer zufälligen Reihenfolge vermessen werden.

Die Kalibrierkurve wird über ein Polynom zweiten Grades dargestellt, dessen Bestimmungskoeffizient (R^2) mindestens 0,9990 betragen muss.

Zumindest einmal am Tag muss eine Überprüfung der Kurve stattfinden. Bei deutlichen Änderungen der Umgebungsbedingungen (z.B. mehr als 2 °C Ansauglufttemperatur, 5 mbar Umgebungsdruck, 5 % relative Luftfeuchte) oder einer Abweichung der Kontrollkraftstoffe von mehr als 0,8 CZ, muss diese neu erstellt werden [31].

Abb. 4-16 zeigt zwei Kalibrierkurven, aufgenommen am selben Tag, wobei die „Kalibrierkurve Beginn“ vor den Untersuchungen der Proben, wohl aber nach einem Motorwarmlaufen von ca. zwei Stunden erfolgte. Im Anschluss an die Messung der Proben, nach ungefähr 4,5 h, erfolgte zur Überprüfung der Kurve eine weitere Aufnahme einer Kalibrierkurve (Kalibrierkurve Ende), welche im Vergleich zur Ersten deutliche Unterschiede aufzeigte.

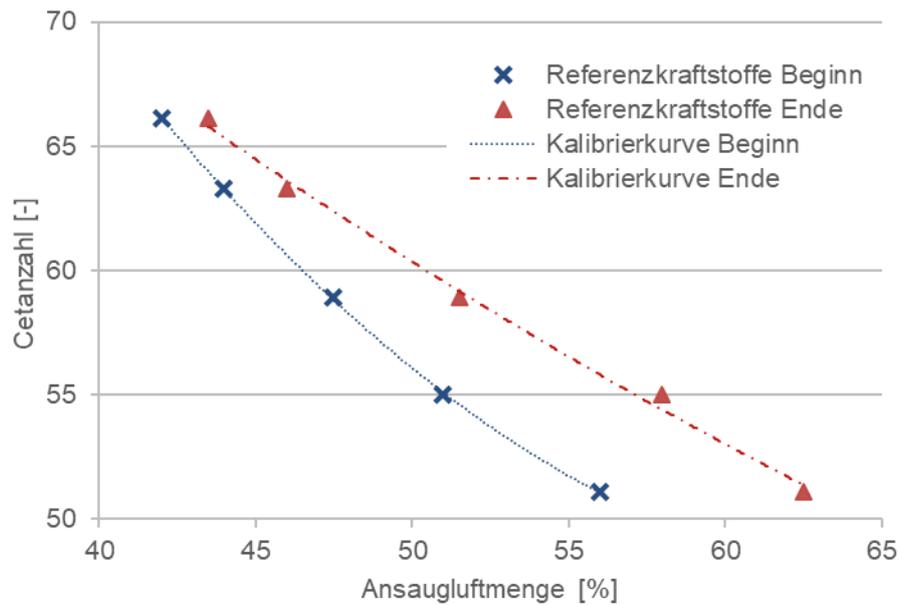


Abb. 4-16: Kalibrierkurven am BASF-Motor

Beginn: $T_{\text{Um}} = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, $p_{\text{Um}} = 993 \text{ mbar}$, $r.L. = 39,4 \%$, Ende: $T_{\text{Um}} = 21,0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $p_{\text{Um}} = 992 \text{ mbar}$, $r.L. = 44,6 \%$

Die Formeln (4-1) und (4-2) zeigen die ermittelten mathematischen Funktionen für die beiden Kalibrierkurven inkl. derer Bestimmungskoeffizienten, wobei LM die am Originalsystem abgelesene Luftmenge beschreibt.

$$CZ_{\text{Beginn}} = 0,03 \cdot LM^2 - 4,017 \cdot LM + 181,93 \quad (4-1)$$

$$R_{\text{Beginn}}^2 = 0,9999$$

$$CZ_{\text{Ende}} = 0,006 \cdot LM^2 - 1,406 \cdot LM + 115,36 \quad (4-2)$$

$$R_{\text{Ende}}^2 = 0,9950$$

CZ_i	Berechnete Cetanzahl	[-]
LM	Abgelesene Ansaugluftmenge	[-]
R_i^2	Bestimmungskoeffizient	[-]

Die maximale Differenz der Umgebungstemperatur an diesem Messtag lag bei $2,61 \text{ } ^\circ\text{C}$, die Differenz des Luftdruckes bei $1,18 \text{ mbar}$ und die relative Luftfeuchte änderte sich während der Messungen um $5,16 \%$. Neben der grafischen Veranschaulichung in Abb. 4-16 kann man anhand der Formeln (4-1) und (4-2) deutlich die Auswirkungen der sich ändernden Parameter erkennen. Neben den Umgebungseinflüssen spielt vorrangig die Entwicklung der Ansaugkanaltemperatur eine Rolle. Eine Auswertung der Cetanzahl mittels Referenzkurve ist demnach nur bedingt möglich, weshalb die Untersuchung der Prüfkraftstoffe mit Hilfe des „Eingabelungsverfahrens“ erfolgt, um diese Einflüsse gering zu halten. Aus Sicht der Norm ist die Verwendung der zweiten Kalibrierkurve bedingt durch den Bestimmungskoeffizienten ohnehin nicht zulässig. Zwar ist der zeitliche Aufwand im Falle der „Eingabelung“ größer, gleichzeitig sind die Ergebnisse aufgrund der zuvor

erläuterten Einflussfaktoren wesentlich genauer. Um einer möglichen Verfälschung der Ergebnisse durch Vermischung der Kraftstoffe während des Kraftstoffwechsels entgegen zu wirken, muss der Motor zwischen fünf und zehn Minuten mit dem neuen Kraftstoff weiter betrieben werden. Pro Messung sind zwei Durchgänge pro Kraftstoff und Referenzkraftstoff erforderlich, womit die Gesamtmesszeit für einen Kraftstoff zwischen 45 und 60 min beträgt.

Durch einen Vergleich der Ansaugtemperaturen des CFR- und des BASF-Motors (Abb. 4-13 und Abb. 4-14) sowie deren mögliche Auswirkung auf die Kalibrierkurve im Falle des BASF-Motors (Abb. 4-16) kann gezeigt werden, welchen positiven Einfluss eine Konditionierung der Ansaugluft auf das Messergebnis hat.

Am CFR-Prüfmotor verläuft die Bestimmung der Cetanzahl immer mithilfe des „Eingabelungsverfahrens“, wodurch die Gefahr einer Messwertverfälschung zusätzlich reduziert wird.

Eine weitere Möglichkeit, die zu Ungenauigkeiten in den Messergebnissen führen kann, ist die Ablesbarkeit. Am CFR ist eine sehr feine Einstellung des Verdichtungsverhältnisses möglich und das Ablesen sowohl am Mikrometer als auch am digitalen Messinstrument erweist sich als unproblematisch. Am BASF hingegen stellt sich die genaue Einstellung der Ansaugluftmenge über das Drosselventil als schwierig dar. Zusätzlich erschwert die Ablesbarkeit der analogen Instrumente eine exakte Bestimmung der Cetanzahl. In [Abb. 4-17](#) wird dies ersichtlich. Durch die geringe Spreizung der Luftmenge zweier Referenzkraftstoffe (bspw.: 47,5 % für 58,9 CZ und 44 % für 63,3 CZ) haben schon geringe Ungenauigkeiten an den Einstellungen bzw. den abgelesenen Werten einen massiven Einfluss auf die daraus interpolierte Cetanzahl.

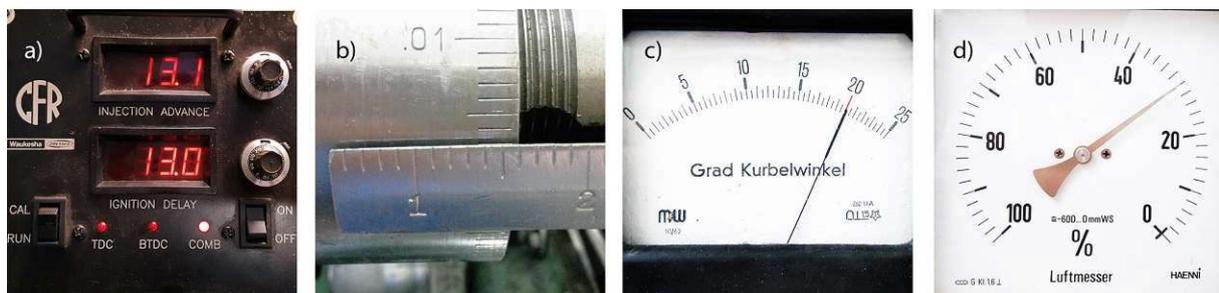


Abb. 4-17: Ableseeinrichtungen der Parameter

- a) Voreinspritzung und Zündverzug am CFR, b) Ablesewert für die Verdichtung am CFR, c) Voreinspritzung und Zündverzug am BASF, d) Luftmenge am BASF

4.5 Einspritzstrahl und Spraybild

Die Beurteilung des Einspritzstrahles erfolgt, wie auch die Messungen der Cetanzahl, mit jenem Abspritzdruck, den die jeweilige Norm vorschreibt. Dieser ist für den CFR mit 103 bar und für den BASF mit 125 bar vorgegeben. Die Aufnahmen des

Einspritzstrahles entstanden bei einer Blendenöffnung von $f/22$ und einer Belichtungszeit von $1/100$ s.

Abb. 4-18 zeigt typische Spritzbilder des CFR-Motors bei Raumtemperatur mit unterschiedlichen Kraftstoffen bzw. im verschmutzten Zustand. Abb. 4-18a wurde mit einer gereinigten Düse und IFA-Diesel erstellt. Der symmetrisch aufgefächerte Einspritzkegel ist gut zu erkennen und stellt den Idealzustand dar. Auf dieselbe Art wurde Abb. 4-18b erstellt, mit dem einzigen Unterschied, dass kein CEC-Diesel verwendet wurde. Stattdessen erfolgte die Aufnahme mit den FAME-Kraftstoffen. Bei einer gereinigten Düse ist zwischen den Einspritzkegeln kaum ein Unterschied festzustellen.

In Abb. 4-18c ist der Einspritzstrahl mit einer nicht gereinigten Düse zu sehen. Dafür wurde je einer der fünf FAME-Kraftstoffe am Motor vermessen, anschließend die Düse demontiert, deren Zustand dokumentiert und wieder eingebaut, um so den Einfluss jedes Kraftstoffes auf die Düsenverschmutzung zu bestimmen. Die auftretenden Verkokungen an der Düse sind bei Verwendung von FAME ausgeprägter als bei fossilen und jenen mit geringem FAME-Gehalt. Wie in Abb. 4-18c nach der Messung von SME zu sehen ist, beeinflussen die Ablagerungen den Einspritzkegel ungemein. Der Einfluss auf die Ablagerungen ist bei allen FAME-Kraftstoffen recht ähnlich. Die Verkokungen der Zündbeschleuniger liegen ebenfalls im Bereich einer normalen Düsenverkokung.

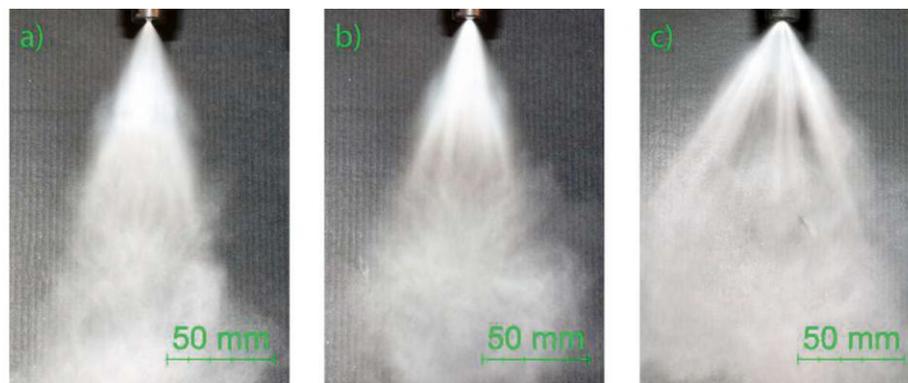


Abb. 4-18: Einspritzstrahl am CFR-Motor

a) gereinigte Düse mit Diesel, b) gereinigte Düse mit FAME, c) verschmutzte Düse nach SME mit Diesel

Die Auswirkungen der Verschmutzung der CFR-Düse sind auch am Spraybild in Abb. 4-19 zu erkennen. Das Spraybild bzw. der Querschnitt des Einspritzstrahles in Abb. 4-19a entstand mit einer gereinigten Düse im Abstand von ca. 7,6 cm zum Aufnahmeträger, wie in [30] vorgeschrieben. Abb. 4-19b hingegen zeigt ein Spraybild mit verkokter Düse aus derselben Entfernung. Die vorliegenden Verkokungen bildeten

sich während der Vermessung eines einzigen Prüfkraftstoffes, in einer Zeitspanne von ca. 1,5 h inkl. der notwendigen Referenzkraftstoffe und vorherigem Warmfahren.

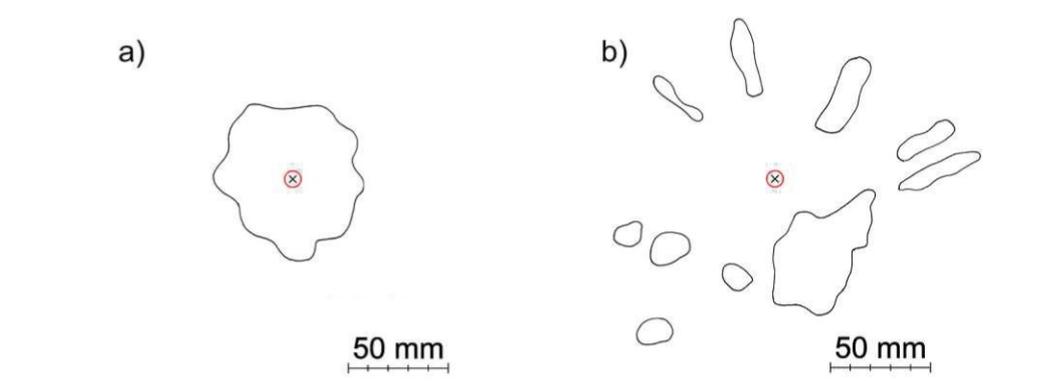


Abb. 4-19: Spraybild am CFR aufgenommen mit Dieselmotorkraftstoff
a) gereinigte Düse, b) verschmutzte Düse

In Abb. 4-20 wird die Düse, sowie die zugehörige Düsennadel des CFR im sauberen bzw. verschmutzten Zustand dargestellt. An der Düse ist erkennbar, dass sich um die Düsennadel, die nicht bündig mit der Stirnfläche abschließt, deutlich mehr Ablagerungen bilden, als auf der restlichen Oberfläche. Zugleich treten Verunreinigungen an der Düsennadel im Bereich der Kerbe auf, was erklärt, weshalb das Spraybild derart beeinflusst wird. Im Vergleich von Abb. 4-20b zu Abb. 4-20c kann man erkennen, dass die Kerbe durch die Verkokungen regelrecht „aufgefüllt“ wurde. Die schimmernde Oberfläche erklärt sich durch den während der Demontage noch in der Düse befindenden Kraftstoff, der durch Trocknung wieder verschwindet.



Abb. 4-20: Düse und Düsennadel am CFR-Motor
a) gereinigte Düsennadel, b) verschmutzte Düsennadel nach B100, c) verschmutzte Düse nach B100

Weitaus gravierender sind die Auswirkungen auf die Düse bei einem Dauerbetrieb von B50 über 30 min (Abb. 4-21a) bzw. einer Vermessung aller FAME hintereinander, ohne die Düse zwischenzeitlich zu reinigen. Die Resultate auf die Einspritzbilder nach Vermessung der fünf FAME sind in Abb. 4-21b und Abb. 4-21c zu sehen. Für die

Aufnahme des Spraybildes war es nicht möglich den Abstand zwischen dem Aufnahmeträger und der Düse auf den von der Norm vorgeschrieben Wert einzuhalten. Bedingt durch die breitere Auffächerung des Einspritzkegels musste der Abstand auf etwa die Hälfte reduziert werden. Eine Vermessung von Kraftstoffen in diesem Düsenzustand ist sowohl wenig sinnvoll als auch kaum möglich. Wandbenetzungen innerhalb der Vorkammer können die Verbrennung deutlich beeinflussen, wie in Kapitel 2.3.5 bereits erwähnt. Es konnte festgestellt werden, dass die Brenndauer im Laufe der Zeit immer größer wurde. Dies kann damit erklärt werden, dass der auftretende Wandfilm für die Abdampfung Zeit benötigt. Eine verschmutzte Düse wirkt sich zusätzlich auf die Motorlaufruhe des Motors (COV-Wert) aus. Durch die Verbrennungsrückstände stieg dieser teilweise auf Werte von über 25 % an, während bei einer Standardmessung ein Wert von 3 % nur sehr selten, kurzfristig und minimal überschritten wird.

Messungen in der Vergangenheit haben bereits gezeigt, dass die Düsenverkockung einen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Cetanzahlen hat [43].

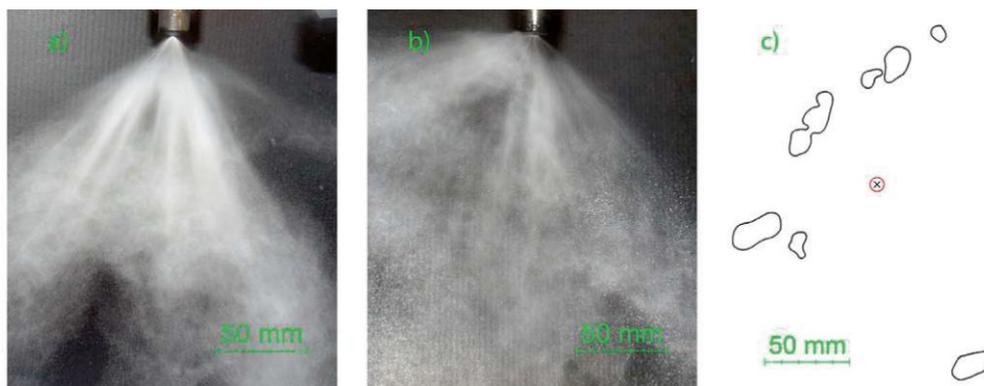


Abb. 4-21: Einspritzstrahl und Spraybild am CFR-Motor mit verschmutzter Düse
a) Einspritzstrahl nach B50, b) Einspritzstrahl nach fünf B100, c) Spraybild nach fünf B100

Im Vergleich dazu ist in [Abb. 4-22](#) der Einspritzstrahl am BASF-Motor dargestellt. Wie am CFR bezieht sich [Abb. 4-22a](#) und [Abb. 4-22b](#) auf eine gereinigte Düse mit IFA-Diesel bzw. FAME-Kraftstoff. Zwischen den beiden Spraybildern sind keine nennenswerten Unterschiede zu erkennen. Der Einspritzstrahl in [Abb. 4-22c](#) zeigt das Verhalten nach Messung eines FAME-Kraftstoffes. Im Vergleich zu den Ergebnissen am CFR ist die Auswirkung der Verkockungen auf den Einspritzstrahl sehr gering und äußert sich lediglich durch eine leichte Ablenkung des Strahles und eine etwas breitere Aufweitung.

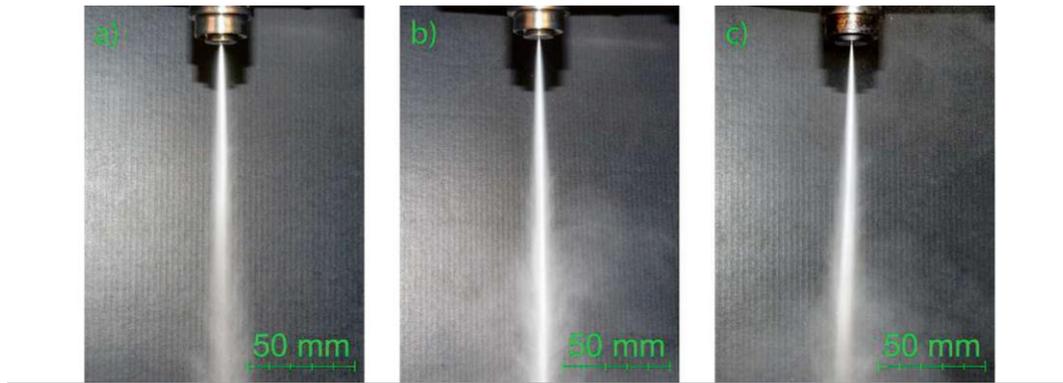


Abb. 4-22: Einspritzstrahl am BASF-Motor

a) gereinigte Düse mit Diesel, b) gereinigte Düse mit FAME, c) verschmutzte Düse nach SME mit Diesel

Für den BASF wurden keine Informationen bezüglich des Spraybildes gefunden, weshalb die Bestimmung ident zu jener des CFR erfolgte. In [Abb. 4-23](#) sind die Einspritzbilder normal zur Düse abgebildet. Differenzen zwischen einer sauberen ([Abb. 4-23a](#)) und einer verschmutzten Düse ([Abb. 4-23b](#)) sind nahezu nicht vorhanden. Auch nach einer Messreihe aller fünf FAME-Kraftstoffe konnte kaum eine Änderung festgestellt werden.

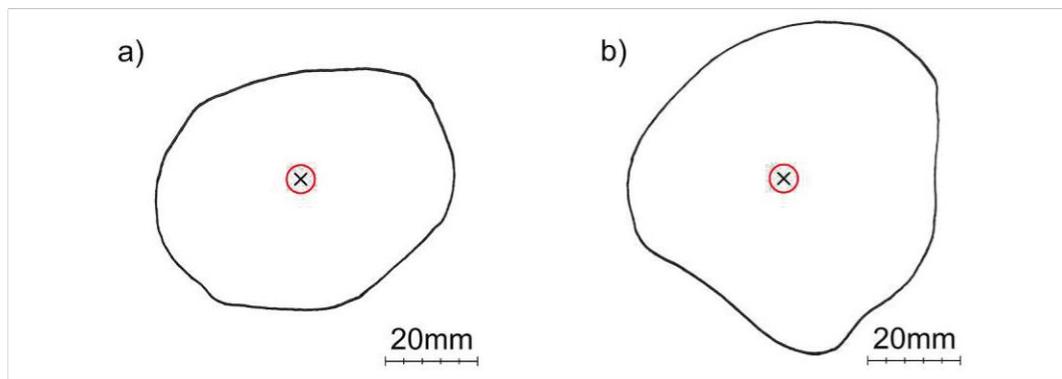


Abb. 4-23: Spraybild am CFR aufgenommen mit Dieselmotorkraftstoff

a) gereinigte Düse, b) verschmutzte Düse

Man kann erkennen, dass der Einspritzstrahl am BASF kaum eine Auffächerung zeigt, weshalb dieser weniger empfindlich auf Verschmutzungen reagiert. Ablagerungen im Bereich des Strahlaustrittes, wie sie am CFR vorgefunden wurden, waren auch an diesem Motor erkennbar. Durch die nach innen versetzte Lage, sowie die relativ geringe Oberfläche der Düsennadel, zeigt sich diese gegenüber Verschmutzungen weniger anfällig als jene des CFR, wie in [Abb. 4-24](#) zu sehen.

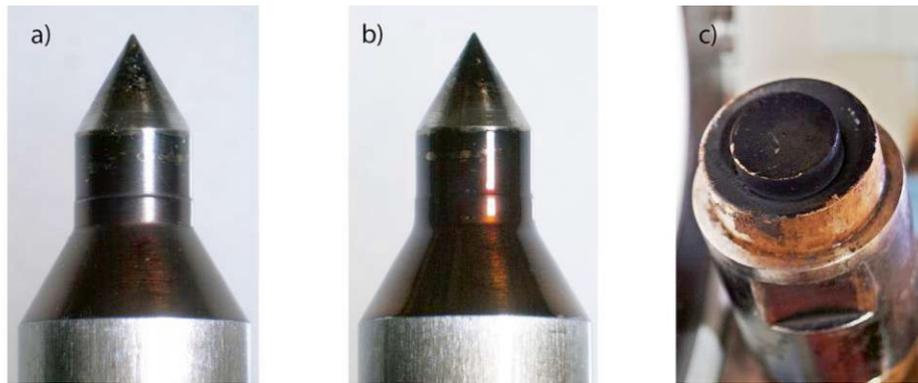


Abb. 4-24: Düse und Düsennadel am BASF-Motor
 a) gereinigte Düsennadel, b) verschmutzte Düsennadel nach B100, c) verschmutzte Düsen nach B100

Derartige Verkokungen konnten an anderen Bauteilen, wie dem Verbrennungsgeber, den Überströmkanälen, sowie den Ventilen, durch eine optische Bewertung mittels Endoskopie weder am CFR noch am BASF festgestellt werden.

4.6 Verbrennungsanalyse

Das Kapitel der Verbrennungsanalyse gliedert sich in zwei Teile. Zu Beginn werden die grundlegenden Unterschiede der beiden Motoren genau analysiert, um im späteren Verlauf die Differenzen der Kraftstoffe am jeweiligen Motor zu bewerten.

Nadelhubgeber

Durch die Analyse des Nadelhubgebersignales, wie auch des Leitungsdruckes direkt vor der Düse, konnte festgestellt werden, dass im Falle des BASF-Motors der Einspritzzeitpunkt zwischen Originalsystem und Indiziersystem bei sonst korrekten Einstellungen nicht übereinstimmt. Der Zeitpunkt des Einspritzbeginnes (EB) erfolgt, wie mithilfe des CFR-Motors in [Abb. 4-25](#) bestätigt, genau zu jenem Zeitpunkt, an dem das Leitungsdrucksignal den maximalen Wert aufweist. Bei einer Einstellung der Voreinspritzung am BASF nach Originalsystem bei 20 °KWvOT erfolgt die tatsächliche Einspritzung entsprechend [Abb. 4-25](#) erst bei 17 °KWvOT. Diese Aussage bestätigt sich außerdem bei Betrachtung des Nadelhubgebersignales, welches im Bereich von 20 °KWvOT noch keinerlei Bewegung der Düsennadel registriert. Mit Hilfe der Kalibriereinstellung konnte das Originalsystem entsprechend der Indizierdaten angepasst werden, sodass das Originalsystem den tatsächlichen Einspritzzeitpunkt und Brennbeginn ausgibt, trotz einer „falsch“ eingestellten Kalibrierung, wie in [Abb. 4-26](#) zu sehen ist. Nach Rücksprache mit der Firma MIBÖ wurde dies bestätigt und mitgeteilt, dass der „Fehler“ bekannt sei.

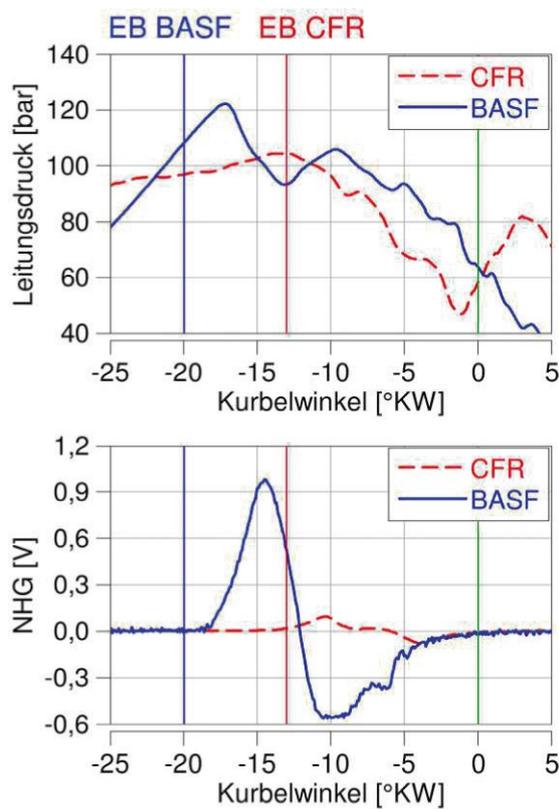


Abb. 4-25: Leitungsdruck und Nadelhubgeber vor der Anpassung am BASF

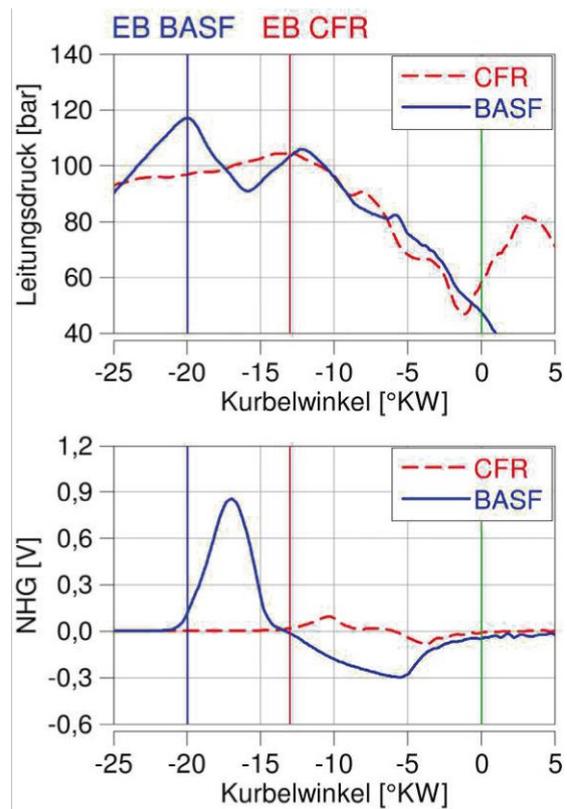


Abb. 4-26: Leitungsdruck und Nadelhubgeber nach der Anpassung am BASF

Weiters ist in Abb. 4-26 erkennbar, dass das Signal des Nadelhubgebers (NHG) einen anderen Verlauf zeigt als in Abb. 4-25. Das Messsignal in Abb. 4-26 wurde über einen Operationsverstärker geführt, um eine Rückkoppelung des Indiziersystems auf das Originalsystems zu verhindern. Das Abgreifen des Nadelhubgebersignales führt ohne Operationsverstärker zu einem Ausfall des Originalsystems, wodurch keine parallele Messung möglich ist.

Anhand der Signale der Einspritzung kann eine grobe Aussage bezüglich des Einspritzverlaufes getätigt werden. Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass die aufgezeigten Werte im Nadelhubgebersignal nicht die absolute Position der Düsenadel widerspiegeln, sondern lediglich deren Bewegung. Für die Bewertung der Einspritzzeit wird jene Zeitspanne zwischen der ersten und der letzten Bewegung der Düsenadel verwendet. Im linken Diagramm in Abb. 4-25 beginnt die Einspritzung am CFR-Motor bei 13 °KWvOT und endet bei ca. 3 °KWvOT. Daraus ergibt sich eine Einspritzzeit von etwa 10 °KW. Am BASF hingegen erfolgt die erste Bewegung bei 17 °KWvOT und endet in etwa im Bereich jener des CFR. Somit kann aufgezeigt werden, dass die Einspritzdauer am BASF, trotz des höheren Einspritzdruckes und der geringeren Einspritzmenge, länger ausfällt.

Zylinderdruck und Heizverlauf

Die folgenden Aufnahmen beziehen sich auf IFA-Diesel im Zuge einer Routinemessung. Für die vorliegenden Messungen war ein Verdichtungsverhältnis von $\varepsilon = 12,08$ am CFR, und eine Luftmenge von $LM = 50,5\%$ am BASF eingestellt.

Abb. 4-27 zeigt den mittels Indizierquarz gemessenen Zylinderdruck sowie den daraus abgeleiteten differentiellen und integralen Heizverlauf gemittelt über 200 Zyklen der beiden Motoren. Der Zylinderdruck am CFR-Motor weist über den gesamten Bereich ein deutlich höheres Niveau auf als der BASF. Einen weiteren Unterschied erkennt man im Bereich des Maximaldruckes. Während sich am CFR ein allmählicher Abfall des Druckes einstellt, ist am BASF ein rapider Druckabfall zu sehen. Anhand der beiden Heizverläufe kann man erkennen, dass die Verbrennung am BASF-Motor deutlich schneller verläuft.

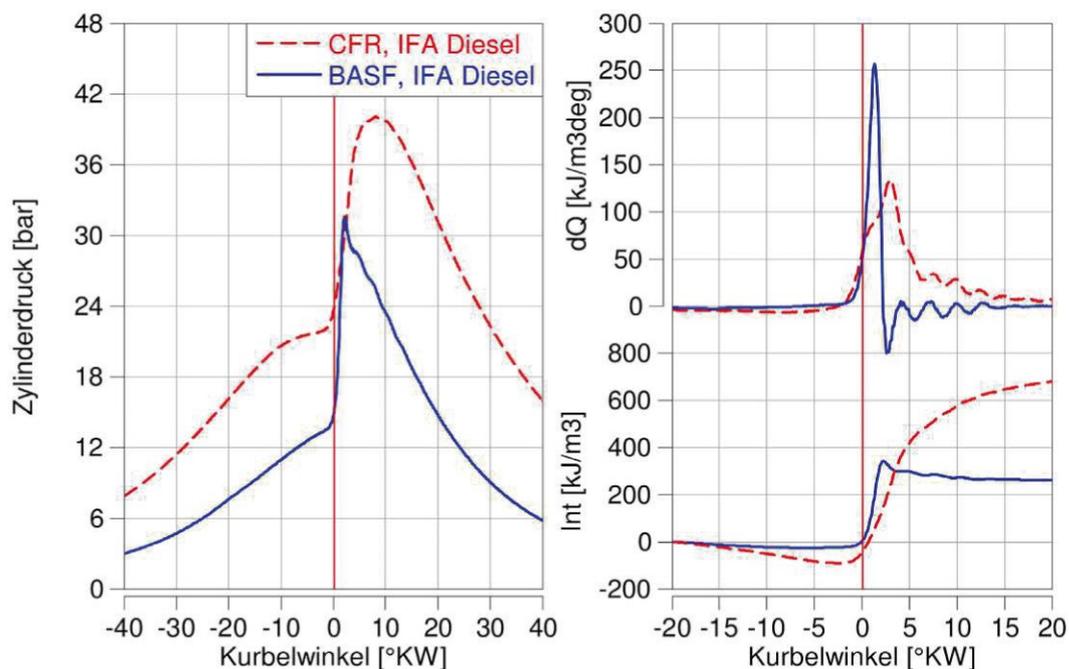


Abb. 4-27: Vergleich von Zylinderdruck und Heizverlauf zwischen CFR und BASF

Die zugehörigen Umsatzpunkte zu Abb. 4-27 sind in Tab. 4-1 eingetragen. Zusätzlich angeführt ist die Brenndauer in Abhängigkeit der Winkelposition als auch unter Berücksichtigung der Drehzahl in ms. Aufgrund der besseren Gemischauffbereitung eines Wirbelkammermotors, steigt die Verbrennungsgeschwindigkeit an, was sich am Temperatur- und Druckgradienten in Abb. 4-27 und Abb. 4-30 bemerkbar macht und sich mit der Literatur aus Kapitel 2.2 deckt. Die Auswirkungen der raschen Verbrennung sind auch subjektiv anhand des Geräuschpegels erkennbar.

Neben der Verbrennungsgeschwindigkeit zeigt sich weiters eine Differenz in den Heizverläufen. Der Beginn der Verbrennung findet aufgrund der Normen, welchen die

Motoren unterliegen, im OT statt. Die Messungen erfolgen allesamt mithilfe der originalen Messsysteme, wodurch sich die Differenzen der Umsatzpunkte zu Beginn erklären lassen. Diese verwenden für die Auswertung das Signal des Verbrennungsgebers, wobei nicht eruiert werden konnte, welche Methode für die Auswertung herangezogen wird. Weiters kann man erkennen, dass sowohl der Umsatzzschwerpunkt (AI 50) als auch das Brennende (AI 90) deutlich unterschiedlich sind.

Am integralen Heizverlauf ist zu erkennen, dass vor der eigentlichen Energieumsetzung ein Abfall zu verzeichnen ist. Der Grund dafür liegt in der Verdampfungsenthalpie des Kraftstoffes, den erhöhten Blowby-Verlusten, bedingt durch die geringe Drehzahl, sowie Wandwärmeverluste aufgrund der großen Brennraumoberfläche bei Kammermotoren und nicht zuletzt von Überströmverluste zwischen Neben- und Hauptkammer. All diese Verluste werden unter dem thermodynamischer Verlustwinkel zusammengefasst. Durch die größere Einspritzmenge sowie die geringere Drehzahl ist der Abfall am CFR-Motor deutlicher zu erkennen als am BASF.

Tab. 4-1: Umsatzpunkte und Brenndauer bezogen auf die Abb. 4-27 in dargestellten Messungen

	Kennwert	Einheit	CFR	BASF
5 % Umsatzpunkt	AI5	°KWnZOT	1,20	0,25
50 % Umsatzpunkt	AI50	°KWnZOT	5,55	1,20
90 % Umsatzpunkt	AI90	°KWnZOT	37,30	1,80
Brenndauer	BD	°KW	36,10	1,55
Brenndauer	BD	ms	6,69	0,26

Für die Auswertung und Berechnung mittels Indiziersystems muss auf die Position des Druckquarz bedacht werden, da sowohl der vorherrschende Druck als auch die Temperatur vor allem zu Beginn der Verbrennung durch den Überströmkanal bzw. den Schusskanal zwischen der Haupt- und der Nebenbrennkammer unterschiedliche Werte aufweisen können. An beiden Motoren ist der Druckquarz in der Nebenkammer verbaut worden, stellen also nicht den Druckverlauf im Hauptbrennraum dar.

Bei den in Abb. 4-27 dargestellten Druckverläufen handelt es sich um Mittelwerte. Bei Betrachtung der Einzelzyklen konnte festgestellt werden, dass das Zylinderdrucksignal am BASF nach Erreichen des OT deutliche Schwingungen aufweist, die weiters einen Einfluss auf die daraus berechneten Größen, wie Heizverlauf oder Brennraumtemperatur haben, wie in [Abb. 4-28](#) zu erkennen. Die Periodendauer,

welche anhand der Indizierdaten ermittelt wurde liegt bei etwa $0,28^\circ\text{KW}$ bzw. $0,047\text{ ms}$. Damit ergibt sich eine Frequenz von knapp über 20 kHz .

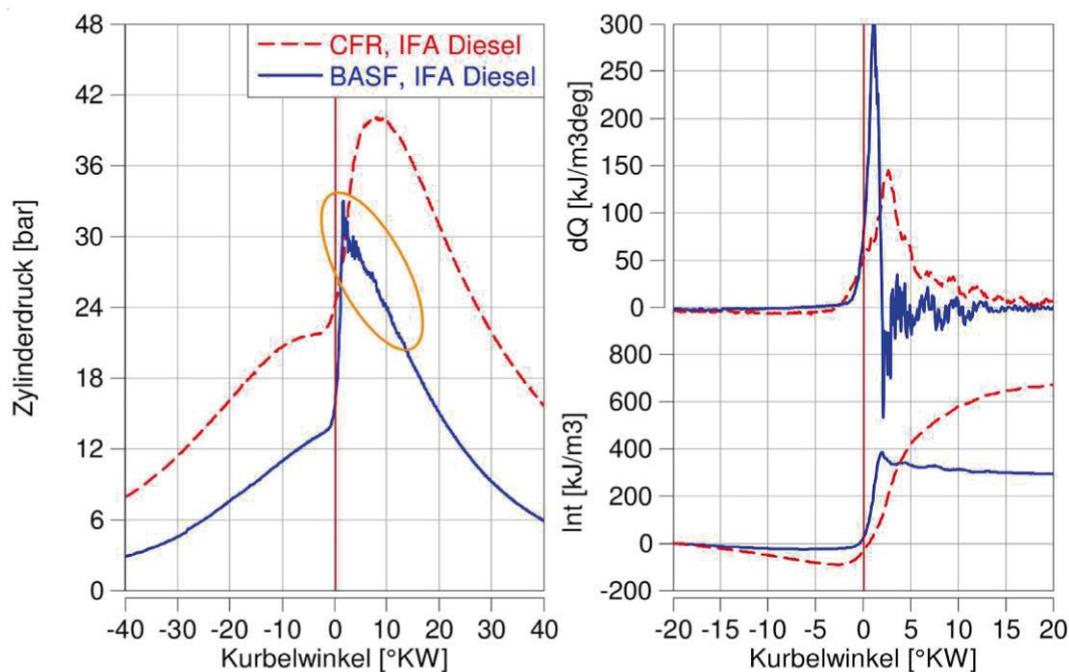


Abb. 4-28: Schwingungen im Zylinderdrucksignal nach OT am BASF

Es ist nahezu ausgeschlossen, dass es sich dabei um einen Defekt des Indizierquarz handelt, wie eine Gegenüberstellung mit dem Verbrennungsgeber zeigt. In [Abb. 4-29](#) sind die Zylinderdruck- und Verbrennungsgebersignale der beiden Motoren aufgezeigt. Wie in [Abb. 4-28](#) handelt es sich dabei um einen Einzelzyklus.

Links dargestellt sind die ermittelten Parameter für den CFR. Man kann erkennen, dass die beiden Messsignale gut korrelieren und einen typischen Druckverlauf für einen Dieselmotor ohne Voreinspritzung darstellen.

Die rechte Seite bezieht sich auf den BASF-Motor. Sowohl im Zylinderdruck- als auch im Verbrennungsgebersignal sind die Schwingungen deutlich erkennbar. Die beiden Kurven deuten auf einen harten Verbrennungsablauf hin, dessen Folge Brennraumresonanzen sind, die sich auch über ein lautes Verbrennungsgeräusch äußern. Die Möglichkeiten um einen „weichen“ Zylinderdruckverlauf zu erreichen, wie ein späterer Einspritzbeginn, ein früherer Zündbeginn oder eine geformte bzw. geteilte Einspritzung sind theoretisch teilweise umsetzbar, durch die Vorgabe des genormten Prüfverfahrens allerdings nicht vorgesehen [3, 31].

Ein Defekt des Winkelmarkengebers konnte ebenfalls ausgeschlossen werden, da alle weiteren direkt gekoppelten Signale, wie Nadelhubgebersignal oder OT-Geber direkt an der Schwungscheibe keine derartigen Abweichungen zeigten.

Für die reine Bewertung der Cetanzahl sind diese Schwingungen nicht relevant, da diese erst im Bereich des maximalen Zylinderdruckes auftreten. Allerdings haben diese Parameter einen Einfluss auf die berechneten Parameter der Indizierung.

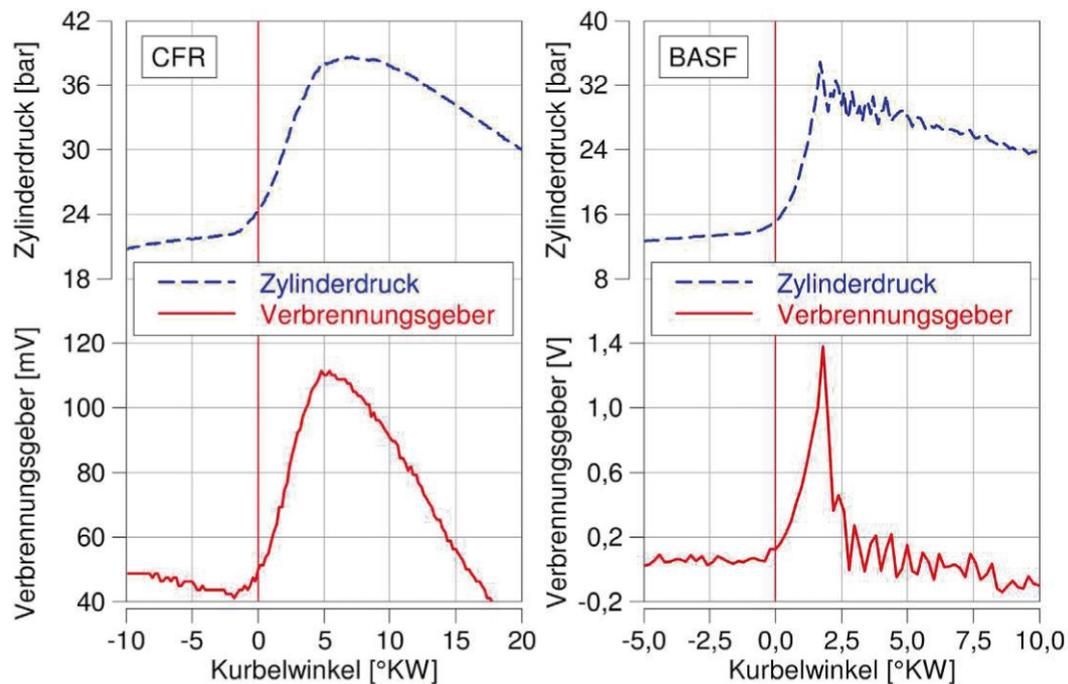


Abb. 4-29: Gegenüberstellung Druckquarz- und Verbrennungsgebersignal am CFR und BASF

Brennraumtemperatur

Neben dem Druck ist für die Selbstzündung vor allem die Zylindertemperatur entscheidend. Bezogen auf die in Abb. 4-27 dargestellten Messwerte sind in Abb. 4-30 die errechneten Zylindertemperaturen dargestellt. Man kann erkennen, dass die Brennraumtemperatur am BASF-Motor deutlich höher liegt, als jene des CFR, trotz der höheren Ansauglufttemperatur.

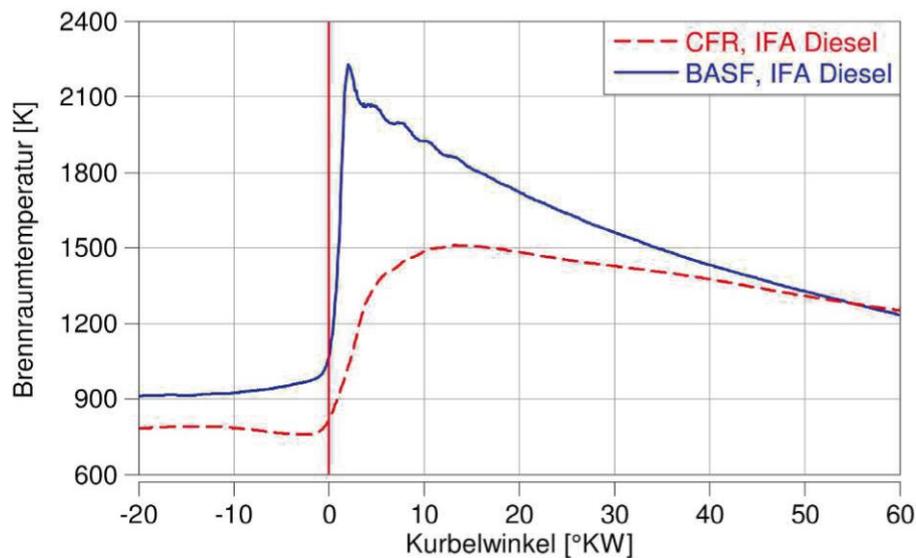


Abb. 4-30: Vergleich der berechneten Brennraumtemperatur am CFR und BASF bezogen auf die Messungen in Abb. 4-27

Die sich am BASF höher einstellenden Temperaturen können vereinfacht mithilfe des Modells des Gleichraumprozess erklärt werden. Ausgehend von einer isentropen Kompression (Gleichung (4-3)) mit bekanntem Isentropenexponent sowie den beiden aus den Einstellungen und Messungen bekannten Parametern, Verdichtungsverhältnis und Ansauglufttemperatur, kann grob die Temperatur nach der Kompression ermittelt werden. Der Isentropenexponent beschreibt dabei einen Stoffwert, der stark von der Temperatur abhängt und einen Wert für Luft zwischen 1,31 bei 1400 °C und 1,4 bei 25 °C aufweist [9].

$$\frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{\kappa-1} \quad (4-3)$$

T_1	Temperatur	[K]
ε	Verdichtungsverhältnis	[-]
κ	Isentropenexponent	[-]

Die reine Betrachtung, dass der Zündverzug mit steigender Temperatur absinkt, führt zu einem Widerspruch bezüglich der beiden Motoren. Die Zündverzugszeit, mit entsprechender Umrechnung über die Nenndrehzahl am CFR ist gegeben mit 2,41 ms jene des BASF mit 3,33 ms. Somit weist der CFR-Motor trotz niedriger Temperaturen einen geringen Zündverzug auf. Ein Grund hierfür könnte eine bessere Gemischaufbereitung durch die feinere Zerstäubung des Kraftstoffes am CFR, wie in Kapitel 4.5 gezeigt, darstellen, welche die physikalische Zündverzugszeit verkürzt.

Weiters konnte sowohl in Bomben- als auch an Motorversuchen festgestellt werden, dass der Zündverzug ebenfalls vom Kammerdruck abhängig ist, wobei der Einfluss bei niedrigem Druck höher ist als bei höherem [17]. Man kann davon ausgehen, dass der Zündverzug mit steigendem Kammerdruck absinkt [18].

Indizierter Mitteldruck

Der vorherrschende Zylinderdruck wirkt sich entsprechend Gleichung (2-1) auf den indizierten Mitteldruck aus, der beim CFR im Bereich von 4,2 bar, beim BASF hingegen bei nur 1,0 bar liegt. Die Mitteldrücke der beiden Motoren über 200 Zyklen sind in [Abb. 4-31](#) dargestellt. Somit weist der CFR-Motor einen Wert auf, der um den Faktor 4 höher liegt als am BASF. Der Grund dafür liegt zum einen im gedrosselten Betrieb und zum anderen an der deutlich niedrigeren Einspritzmenge pro Zyklus. Die indizierten Mitteldrücke lassen darauf deuten, dass beide Motoren im Teillastbetrieb betrieben werden.

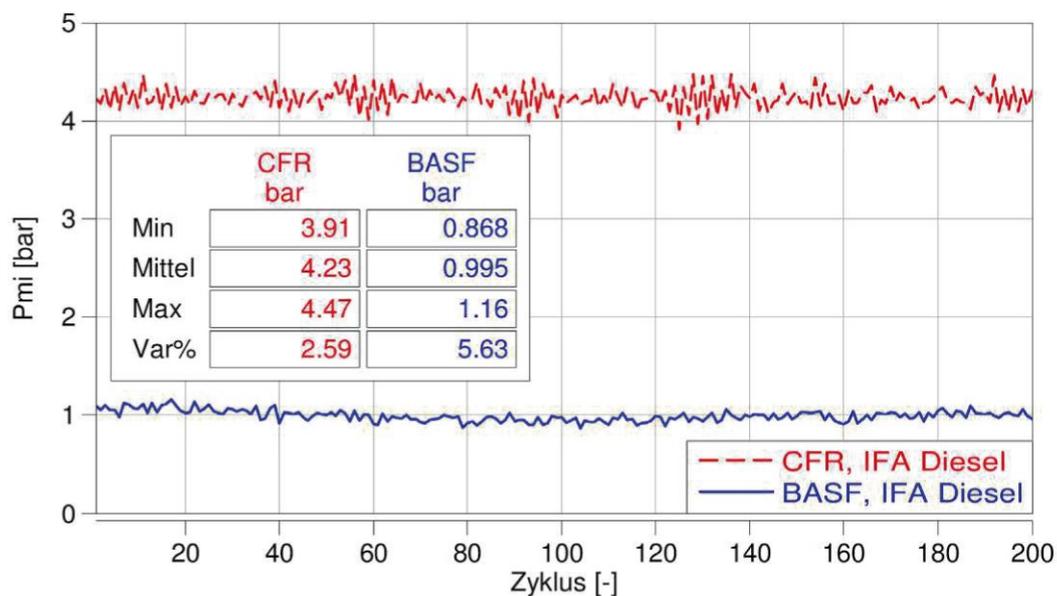


Abb. 4-31: Zyklusverlauf indizierter Mitteldruck am CFR und BASF

Neben dem Mitteldruck ist in der Tabelle in [Abb. 4-31](#) der Varianzkoeffizient (Var%) über die besagten 200 Zyklen aufgetragen. Dabei fällt auf, dass dieser am BASF deutlich höher ausfällt, was vor allem dem geringeren Mitteldruck zuzuschreiben ist.

Im weiteren Verlauf werden die Unterschiede der Kraftstoffe zueinander analysiert. Durch die bei FAME sehr großen Differenzen bezüglich der Cetanzahl werden für die Analyse vorrangig diese Daten herangezogen, um merkliche Unterschiede herzuleiten.

Aufgrund der Temperatur- und Druckabhängigkeit des Zündverzuges wurden die Parameter im Zylinder für den Zeitpunkt der Einspritzung analysiert. Die in [Abb. 4-32](#) und [Tab. 4-2](#) dargestellten Zylinderdrücke und -temperaturen stellen jene Parameter dar, die der Kraftstoff beim Eintritt in den Brennraum vorfindet. Aufgrund zyklischer Schwankungen sind die Mittelwerte aufgetragen.

Bei der Betrachtung von Abb. 4-32 muss darauf bedacht werden, dass der Einspritzbeginn am BASF-Motor 7 °KW vor jenem des CFR liegt. Die relevante Kurbelwellenposition für den CFR-Motor liegt bei 13 °KWvOT und beim BASF bei 20 °KWvOT. Während dieser Zeit steigen sowohl die Temperatur als auch der Druck im Zylinder weiter an. Würden die Verhältnisse zum Zeitpunkt derselben Kurbelwellenposition betrachtet werden, wäre die Differenz noch größer.

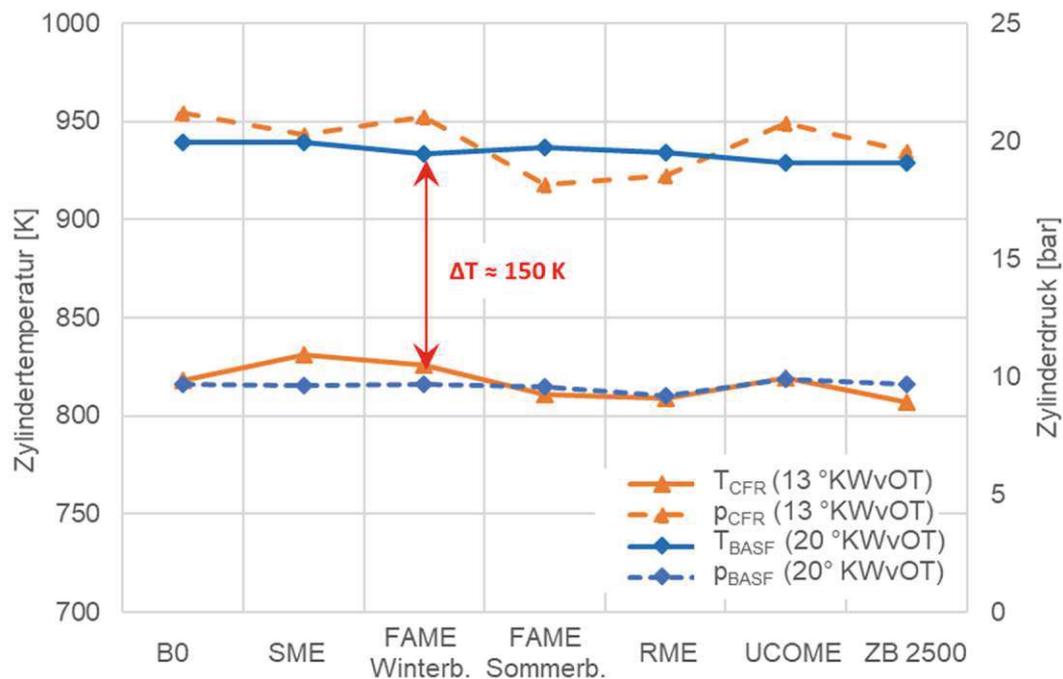


Abb. 4-32: Temperatur im Zylinder und Zylinderdruck zum Zeitpunkt des Einspritzvorganges am CFR und BASF

Wie in der vorherigen Analyse mit IFA-Diesel zeigen sich auch bei den FAME-Kraftstoffen die deutlichen Unterschiede der beiden Motoren.

Ferner kann man sehen, dass sowohl die Temperaturen als auch die Drücke nur geringe Schwankungen aufzeigen. Dabei muss zusätzlich beachtet werden, dass die Messungen zum Teil an unterschiedlichen Tagen erfolgten. Dementsprechend können auch die Umwelteinflüsse, wie Umgebungsdruck und relative Luftfeuchte variieren, dies kann Auswirkungen auf die Einstellungen der Motoren und die Ergebnisse haben. Neben den eben genannten unbeeinflussbaren Parametern können auch zyklische Schwankungen in der Verbrennung Differenzen hervorrufen. Wie in Kapitel 4.3 aufgezeigt, reagiert der BASF Motor zum Teil stark auf unterschiedliche Parameter.

Ein Zusammenhang der Reaktion der Zündbeschleuniger mit der Brennraumtemperatur kann nahezu ausgeschlossen werden, da sowohl die Zersetzungs- also auch die Zündtemperatur des Zündbeschleunigers zum Zeitpunkt der Einspritzung an beiden Motoren deutlich überschritten wird.

Tab. 4-2: Parameter zum Zeitpunkt der Einspritzung

Parameter	CFR		BASF	
	p _z [bar]	T _z [K]	p _z [bar]	T _z [K]
B0	19,93	818	9,64	954
Zündbeschleuniger 2500 ppm	19,05	807	9,64	935
SME	19,95	831	9,59	943
FAME- Winterblend	19,45	826	9,69	952
FAME- Sommerblend	19,73	811	9,55	918
RME	19,50	809	9,17	922
UCOME	19,07	819	9,89	949

Im direkten Vergleich eines FAME-Kraftstoffes zum IFA-Diesel sind aufgrund der höheren Cetanzahl niedrigere Verdichtungsverhältnisse bzw. geringere Luftmengen erforderlich. Am CFR-Motor macht sich dies am Druckverlauf in [Abb. 4-33](#), sowie im Temperaturverlauf in [Abb. 4-34](#) bemerkbar. Ein Abfall des Kompressionsdruckes, sowie der Temperatur im Zylinder sind direkt abhängig vom Verdichtungsverhältnis. Die Messungen der aufgezeigten Ergebnisse in [Abb. 4-33](#) und [Abb. 4-34](#) erfolgten direkt nacheinander, sodass der Einfluss weiterer Faktoren vernachlässigt werden kann.

Die dargestellten Verläufe von Druck, Temperatur und Heizverlauf zeigen am IFA-Diesel allesamt ein höheres Niveau auf. Insbesondere aufgrund des Heizwertes und der konstanten Einspritzmenge kann darauf geschlossen werden, dass der Heizwert für UCOME niedriger liegt als jener des IFA-Diesel. In der Literatur wird der Brennwert für FAME-Kraftstoffe mit 37,1 MJ/kg [21] angegeben, was diese Aussage bestätigt.

Neben den Maxima konnten keine gravierenden Änderungen am Verlauf der Kurven festgestellt werden, die auf eine Fehlauwertung des Originalsystems deuten würde.

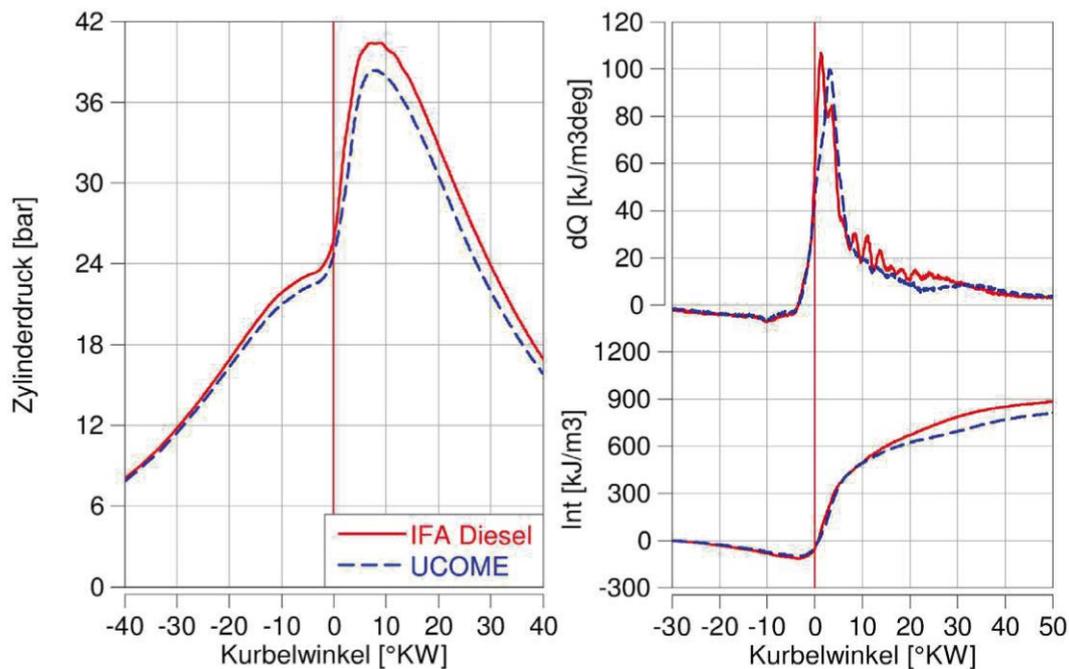


Abb. 4-33: Druckverlauf und Heizverlauf am CFR für IFA-Diesel und UCOME

An den Zündbeschleunigern konnte im direkten Vergleich mit B0 keine Differenz des Maximums im integralen Heizverlauf festgestellt werden. Somit besteht die Annahme, dass die Zündbeschleuniger aufgrund der geringen Menge (max. 2 500 ppm) den Heizwert des Grundkraftstoffes kaum beeinflussen.

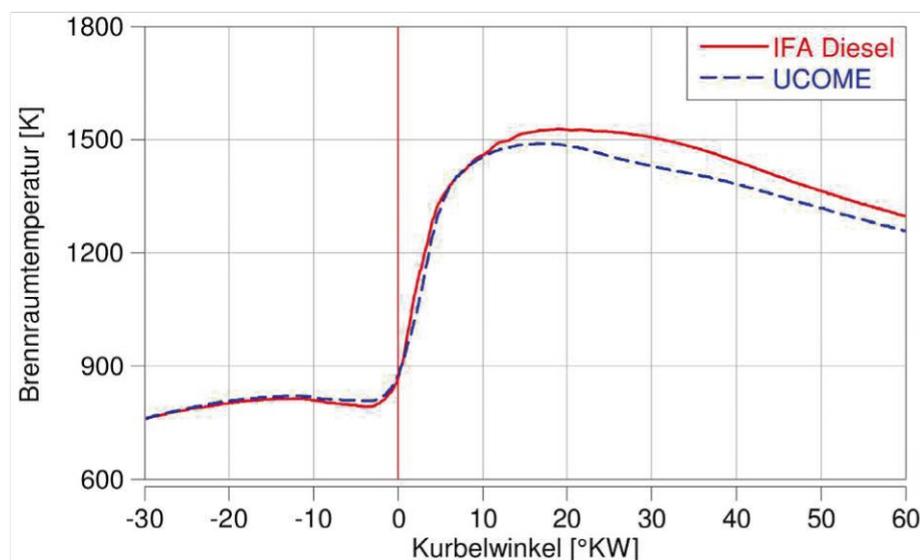


Abb. 4-34: Temperaturverlauf am CFR für IFA-Diesel und UCOME bezogen auf die Messung aus Abb. 4-33

Wie am BASF erfolgt eine Gegenüberstellung der Indizierdaten von IFA-Diesel am BASF ebenfalls mit UCOME. Die Entscheidung für diesen Kraftstoff fiel nicht zuletzt aufgrund der höchsten Differenz in der Cetanzahl zwischen den beiden Motoren. Wie am CFR sind am BASF in [Abb. 4-35](#) keine Unterschiede bis auf die zuvor beschrieben zu sehen.

Somit kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass das Originalsystem ordnungsgemäß arbeitet.

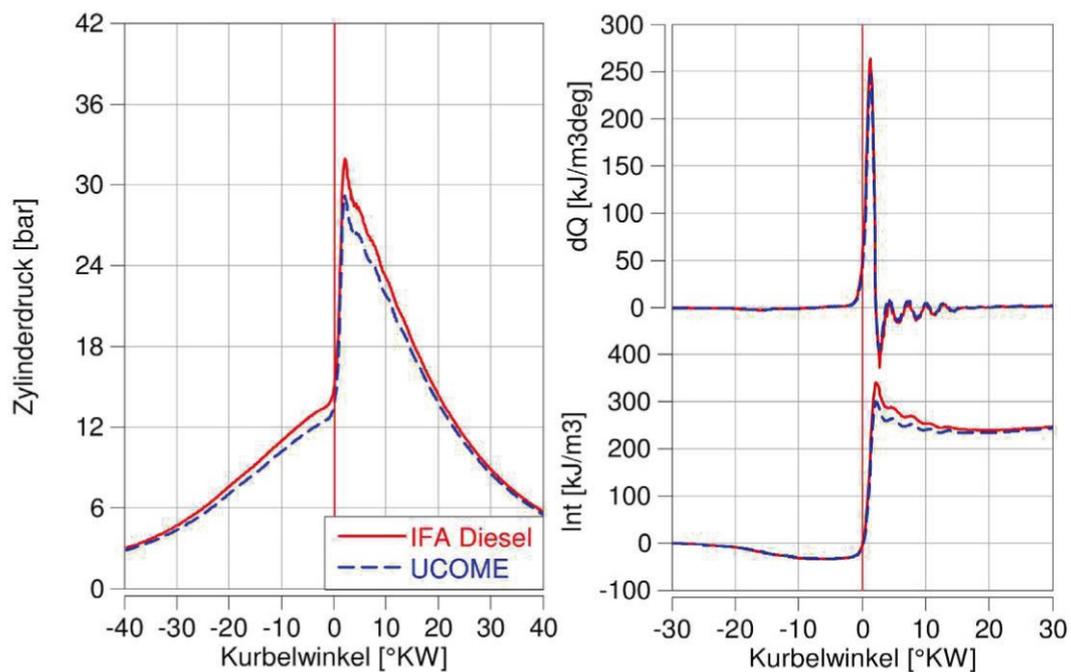


Abb. 4-35: Druckverlauf und Heizverlauf am BASF für IFA-Diesel und UCOME

In [Abb. 4-36](#) sind die Temperaturverläufe für IFA-Diesel und UCOME am BASF aufgetragen.

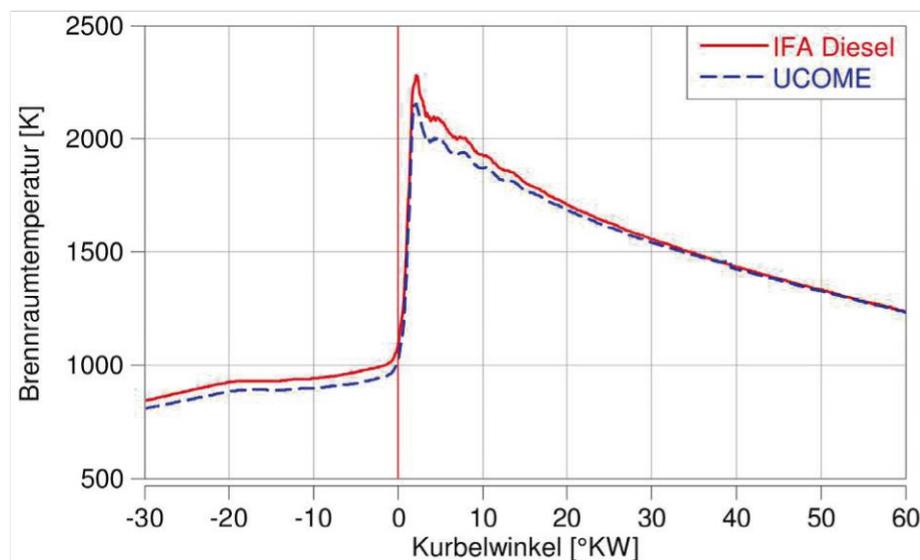


Abb. 4-36: Temperaturverlauf am BASF für IFA-Diesel und UCOME bezogen auf die Messung aus [Abb. 4-35](#)

In [Tab. 4-3](#) sind die durchschnittlich indizierten Mitteldrücke über die geprüften Kraftstoffe dargestellt. Die dargestellten Unterschiede am CFR-Motor zwischen den Kraftstoffen lassen sich, wie zuvor erwähnt, durch den Heizwert der Kraftstoffe, als

auch durch die zugehörigen Verdichtungsverhältnisse erklären. Im Fall von RME wirken sich beide Parameter im Vergleich zu IFA-Diesel negativ auf den Mitteldruck aus. Neben dem geringeren Heizwert führt die höhere Cetanzahl zu einem Absenken des Verdichtungsverhältnisses.

Am BASF führt der niedrigere Energiegehalt der FAME-Kraftstoffe ebenfalls zu einem Abfall. Weiters wirken sich die durch das Prüfverfahren bedingten höheren Drosselungen bei steigender Zündwilligkeit in einem Abfall des Gesamtniveaus des Zylinderdruckes aus. Somit ist, wie am CFR, ein geringerer Mitteldruck für die FAME-Kraftstoffe die Folge, was mithilfe von Tab. 4-3 deutlich wird.

Tab. 4-3: Indizierter Mitteldruck der Kraftstoffe am CFR- und BASF-Motor

Kraftstoff	CFR	BASF	Einheit
IFA Diesel	4,3	1,00	bar
B0	4,3	0,99	bar
Zündbeschleuniger 2500 ppm	4,1	0,96	bar
SME	3,7	0,90	bar
FAME – Winterblend	4,1	0,92	bar
FAME – Sommerblend	3,7	0,91	bar
RME	3,9	0,91	bar
UCOME	4,0	0,89	bar

Wie bei den zuvor beschriebenen, vorherrschenden Temperaturen und Drücken im Brennraum, handelt es sich bei den indizierten Mitteldrücken ebenfalls um Messungen aus verschiedenen Tagen, die zum Teil variieren können.

Ein Vergleich des COV-Wertes zeigt, dass dieser am CFR während der Vermessung von reinem FAME im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen ansteigt. Je länger ein solcher Kraftstoff verwendet wird, desto weiter steigt der Variationskoeffizient an. Schon zu Beginn der Messung liegt dieser höher als im Normalfall, verschlechtert sich aber kontinuierlich. Eine mögliche Begründung für den allmählichen Anstieg liegt an der Veränderung des Spraybildes, hervorgerufen durch die sich bildenden Verkokungen im Bereich der Düsenadel, die im Extremfall zu Wandbenetzungen führen können, wie in Kapitel 4.5 gezeigt. Ein erneuter Wechsel zu anderen Kraftstoffen ändert nur bedingt etwas daran, was diese Annahme bestätigt.

Die FAME-Kraftstoffe äußern sich am BASF ebenfalls durch eine geringere Laufruhe. Im Gegensatz zum CFR-Motor klingt dieses Phänomen nach einem Kraftstoffwechsel hingegen wieder ab. Der COV-Wert sinkt sodann wieder auf den vorherigen Wert.

In [Abb. 4-37](#) sind repräsentativ der Verlauf des indizierten Mitteldruckes über 200 Zyklen, sowie der sich über diese Zeit ergebende COV-Wert der beiden Motoren dargestellt. Bei dem im Diagramm dargestellten Kraftstoff handelt es sich um UCOME.

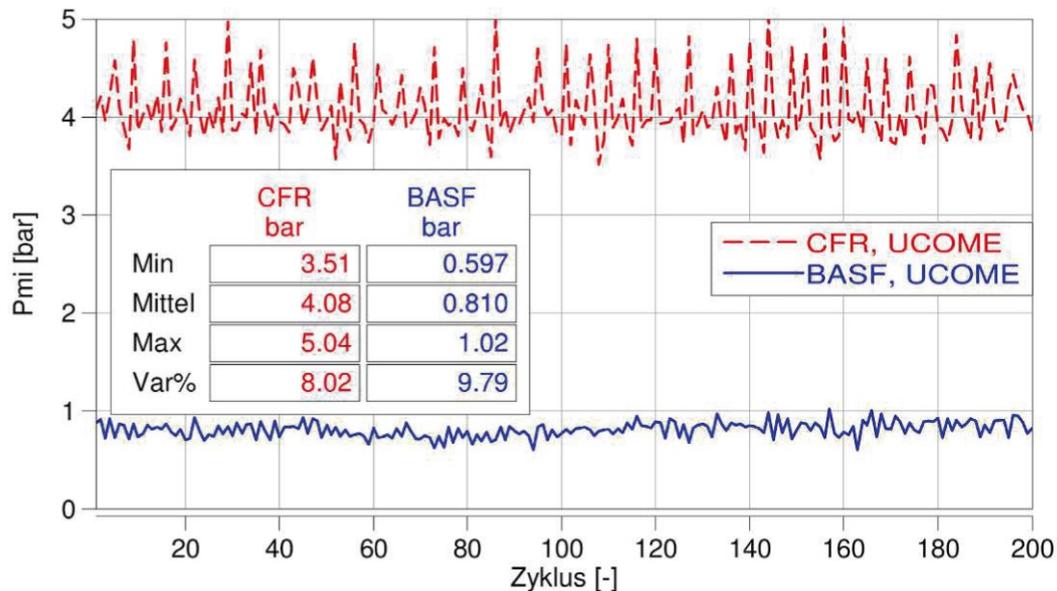


Abb. 4-37: Zyklusverlauf indizierter Mitteldruck am CFR und BASF ermittelt mit UCOME

Im laufenden FAME-Betrieb konnten am BASF des öfteren Verbrennungsaussetzer beobachtet werden, wie sie in [Abb. 4-38](#) zu sehen sind. Es sind die drei Zyklen vor, sowie der Zyklus des Aussetzens (4. Zyklus) abgebildet. Zyklus 1 stellt den Normalzustand dar. Man kann erkennen, dass nach diesem in Zyklus 2 das Maximum des Leitungsdruck-, wie auch des Nadelhubgebersignales zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Im nächsten Zyklus ist zu sehen, dass die beiden Signale noch weiter nach spät laufen und der maximale Leitungsdruck abfällt. Im vierten Zyklus fällt der Druck gar so weit ab, dass die Düse nicht mehr öffnet und eine Verbrennung ausbleibt. Im weiteren Verlauf steigen alle Signale wieder auf ihren Normalwert an. Bei rein mineralischen Kraftstoffen waren derartige Erscheinungen nicht zu sehen, weshalb deren Ursache, die nicht ergründet werden konnte, möglicherweise auf die Viskosität zurückzuführen ist.

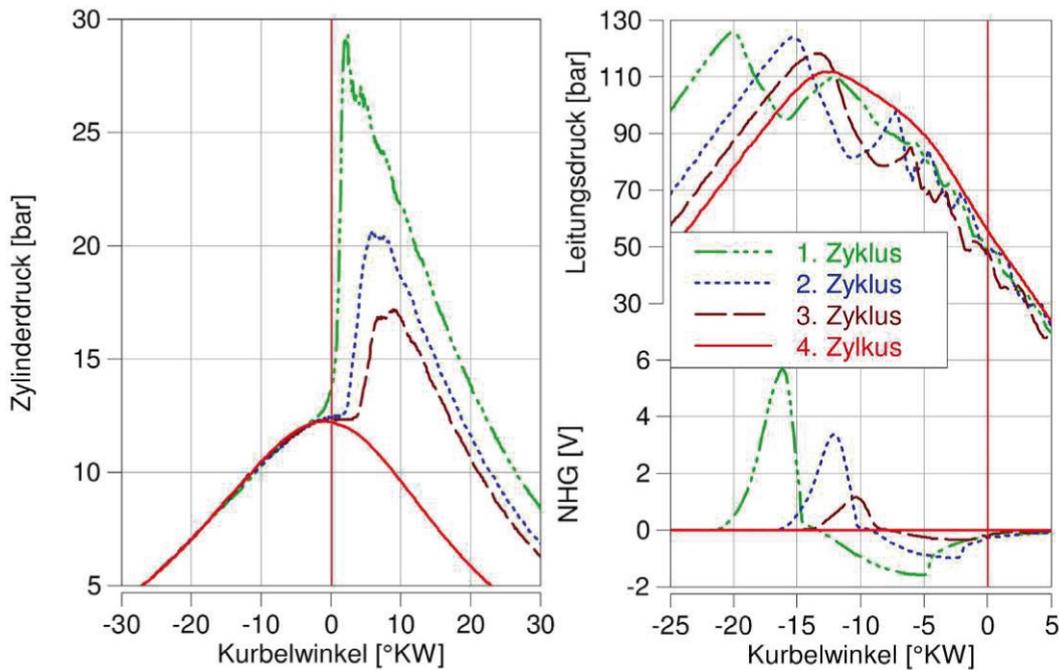


Abb. 4-38: Verbrennungsaussetzer im FAME-Betrieb am BASF

Aufgrund großer Differenzen der Viskosität und Dichte, sowie der zuvor aufgezeigten Verbrennungsaussetzer erfolgte eine Analyse des Einspritzsignales. Eine Änderung im Spraybild war zwischen den verschiedenen Kraftstoffen kaum zu erkennen, wie in Kapitel 4.5 analysiert.

In [Abb. 4-39](#) sind für den CFR-Motor die Leitungsdrucksignale für die drei verschiedenen Kraftstoffe B0, T/U-Referenzkraftstoff mit einer Cetanzahl von 60,5 CZ und einen reinen FAME-Kraftstoff (UCOME) dargestellt. In [Abb. 4-40](#) hingegen sind die Nadelhubgebersignale des BASF-Motors dargestellt, da aus den Druckverläufen der Leitung keine eindeutige Aussage getroffen werden kann. Die sich für den T/U-Kraftstoff ergebende Viskosität von $1,96 \text{ mm}^2/\text{s}^3$, stellt die niedrigste dieser drei Kraftstoffe dar, während UCOME mit einer Viskosität von $4,7 \text{ mm}^2/\text{s}$ die höchste aufweist.

Sowohl am CFR als auch am BASF fällt auf, dass die Einspritzdauer für dieselbe Menge an Kraftstoff mit steigender Viskosität ansteigt. Während die Differenz von IFA-Diesel und T/U 60,5 aufgrund der ähnlichen Viskositäten gering sind, sind die Auswirkungen der höheren Viskosität von UCOME deutlich ersichtlich. Das in den beiden Diagrammen in [Abb. 4-39](#) und [Abb. 4-40](#) eingezeichnete Δt entspricht der zeitlichen Differenz der Einspritzdauer zwischen dem T/U-Kraftstoff und UCOME. Am CFR Motor verlängert sich die Einspritzung um $1,5 \text{ °KW}$, was $11,5 \%$ entspricht und wird erst beendet, nachdem die Verbrennung bereits gestartet ist bei einem Wert von $1,1 \text{ °KWnOT}$. Am BASF äußert sich die höhere Viskosität ebenfalls in einer

³ Mischungsverhältnis T/U 60,5: T-28: U21 = 70: 30

verlängerten Einspritzdauer von 0,9 °KW, was 4,5 % entspricht. Allerdings endet der Einspritzvorgang noch immer deutlich vor dem Verbrennungsbeginn im OT.

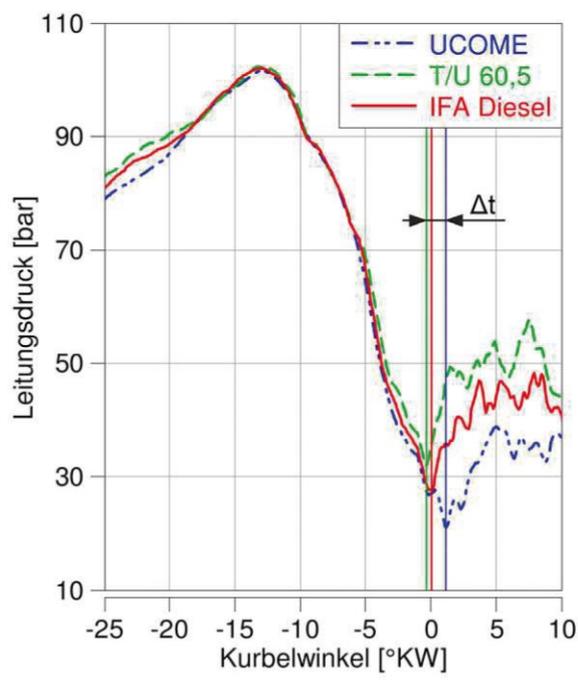


Abb. 4-39: Leitungsdrucksignal zum Zeitpunkt der Einspritzung am CFR

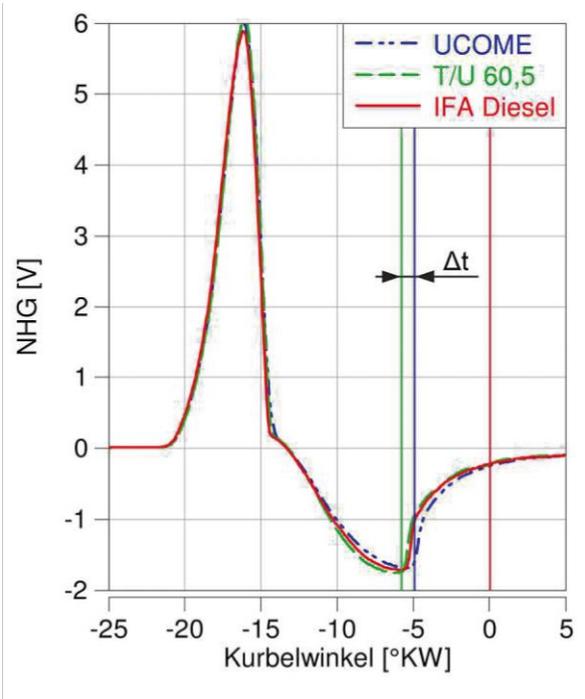


Abb. 4-40: Nadelhubgebersignal zum Zeitpunkt der Einspritzung am BASF

Bei Vermessungen der Prüfkraftstoffe konnten unter üblichen Bedingungen kaum Unterschiede bezüglich der Brenndauer verzeichnet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Brenndauer aller Prüfkraftstoffe im jeweiligen Motor zeitlich ident ist.

Wie bereits erwähnt, wurde zusätzlich ein Versuch als Dauerlauf mit B50 an den beiden Motoren durchgeführt. In [Abb. 4-41](#) sind neben der Änderung des Brennbeginns und Schwerpunktlage der Verbrennung die Änderung der Brenndauer bei konstant gehaltenem Einspritzzeitpunkt für den CFR eingetragen. Dabei fällt auf, dass die Schwerpunktlage weiter nach spät verschoben ist und die Brenndauer sich über die Zeit verlängert. Auch dies deutet auf eine Wandbenetzung durch den veränderten Einspritzkegel hin. Der sich an der Wand abgesetzte Kraftstoff verdampft aufgrund der geringeren Temperatur langsamer, was die Verbrennung verzögert. Die Veränderungen sind bezogen auf die Startwerte bei 0 min. Durch die unempfindlichere Düse gegenüber Verkokungen sind die Auswirkungen am BASF Motor deutlich geringer, wie in [Abb. 4-42](#) dargestellt.

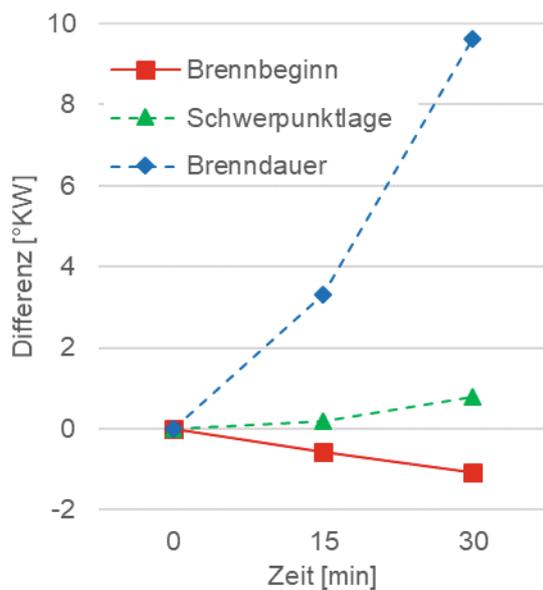


Abb. 4-41: Änderungen am Heizverlauf am CFR im Betrieb mit B50

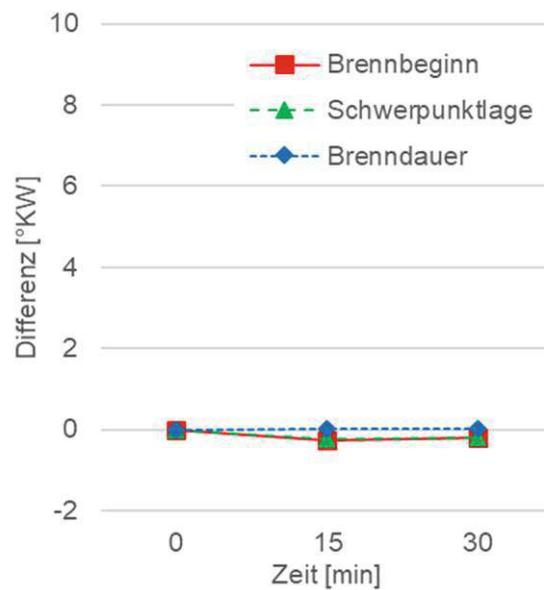


Abb. 4-42: Änderungen am Heizverlauf am BASF im Betrieb mit B50

Weitere Parameter, die einen Einfluss auf den Zündverzug haben können, wie Drall, Turbulenzen, sowie Interaktionen zwischen kalten Wänden und Einspritzstrahl wurden in dieser Arbeit nicht untersucht.

4.7 Parametervariation

Anhand der vorherigen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Cetanzahlen gemessen mit dem CFR- bzw. dem BASF-Motor zum Teil deutliche Unterschiede aufweisen, aber auch die im Brennraum vorliegenden Zustandsgrößen erhebliche Unterschiede aufzeigen. Durch gezielte Änderungen der Parameter soll nun untersucht werden, inwieweit ein Angleich der BASF-Messergebnisse an die allgemein gültigen CFR-Ergebnisse möglich ist. Die Variation umfasste dabei alle möglichen Parameter, die am BASF-Motor verändert werden können.

Diagramme des Zündverzuges über die Temperatur, wie in der Literatur üblich, sind in diesem Falle nicht möglich, da am Prüfmotor der Zündverzug durch Änderung des Verdichtungsverhältnisses bzw. der Luftmenge konstant gehalten wird.

Aus zeitlichen Gründen wurden einfache Versuche durchgeführt, was bedeutet, dass vorerst der IFA-FAME vermessen wurde und eventuell ein fossiler Kraftstoff. Waren Anzeichen dafür zu sehen, dass sich durch die Variation eines Parameters eine Änderung an der Bewertung der Cetanzahl ergibt, wurden die zu untersuchenden Kraftstoffe vermessen, um die aufgestellte Hypothese zu überprüfen. Die Variationen erfolgten hauptsächlich am BASF-Motor, mit Ausnahme der Variationen in Kapitel 4.7.4 und 4.7.5.

Bei IFA-FAME handelt es sich um einen reinen FAME-Kraftstoff, der vom Institut zur Verfügung gestellt wurde, da die anderen FAME-Reinstoffe nicht mehr in ausreichender Menge für die Anzahl an Versuchen zur Verfügung standen. Zuvor durchgeführte Untersuchungen zeigten, dass bei diesem Kraftstoff, dessen genaue Bezeichnung unbekannt ist, ebenfalls große Differenzen bezüglich der Cetanzahl zwischen den beiden Motoren auftraten. Die unter Normbedingungen ermittelten Cetanzahlen für IFA-FAME, sowie B0 gemessen am CFR und BASF sind in Tab. 4-4 gegenübergestellt.

Tab. 4-4: Unter Normbedingungen ermittelte Cetanzahl für IFA-FAME und B0

Kraftstoff	CFR	BASF	Einheit
IFA-FAME	55,4	59,2	CZ
B0	51,7	51,5	CZ

Für eine systematische Bewertung wurde festgelegt, jeweils nur einen fixierten Parameter zu variieren, um eine gegenseitige Beeinflussung zu verhindern. Die für die Bestimmung der Cetanzahl notwendigen Parameter, wie das Verdichtungsverhältnis am CFR bzw. die Luftmenge am BASF wurden weiterhin variabel gehalten.

4.7.1 Variation der Einspritzmenge

Eine Variation der Einspritzmenge erfolgte bereits zu Beginn der ersten Messdurchführungen am BASF-Motor. Dabei konnte am Originalsystem beobachtet werden, dass mit steigender Einspritzmenge die Zündverzugszeit ebenfalls ansteigt, unter der Voraussetzung, dass die anderen Parameter unverändert bleiben, also auch der Einspritzzeitpunkt auf einem Wert von 20 °KW gehalten wird.

Für eine genaue Bestimmung der Zündverzugszeiten, muss die Auswertung anstelle des Originalsystems über eine Analyse der Indizierdaten erfolgen, was sich jedoch ebenfalls als relativ schwierig und ungenau herausstellte. Der Grund dafür liegt zum einen in der sehr geringen Änderung des Zündverzuges durch unterschiedliche Einspritzmengen und zum anderen an den Zyklusschwankungen des Motors, sowie der geringen Messauflösung des Nadelhubgebersignales von 0,2 °KW.

In Abb. 4-43 sind für verschiedene Einspritzmengen die Zündverzugszeiten, sowie die zugehörigen Luftwerte und indizierten Mitteldrücke eingetragen.

Die Punkte für den Zündverzug wurden lediglich für eine Fördermenge von 8 ml/min, was der Einstellung der Norm entspricht, und die unteren bzw. oberen Extrema eingezeichnet. Die dazwischen liegenden Werte wurden ausgeschlossen, da diese den zu erkennenden Trend zum Teil verfälschen und zu Fehlinterpretationen führen könnten. Die Differenzen des Zündverzuges zwischen den unterschiedlichen

Einspritzmengen, trotz einer Mengenvariation von knapp 30 % zeigte lediglich eine Differenz von ca. 0,14 °KW. Die im Diagramm dargestellte Fördermenge entspricht nicht der Einspritzmenge, also jener Kraftstoffmenge, die tatsächlich in den Brennraum eingespritzt wird, worauf im Anschluss genauer eingegangen wird.

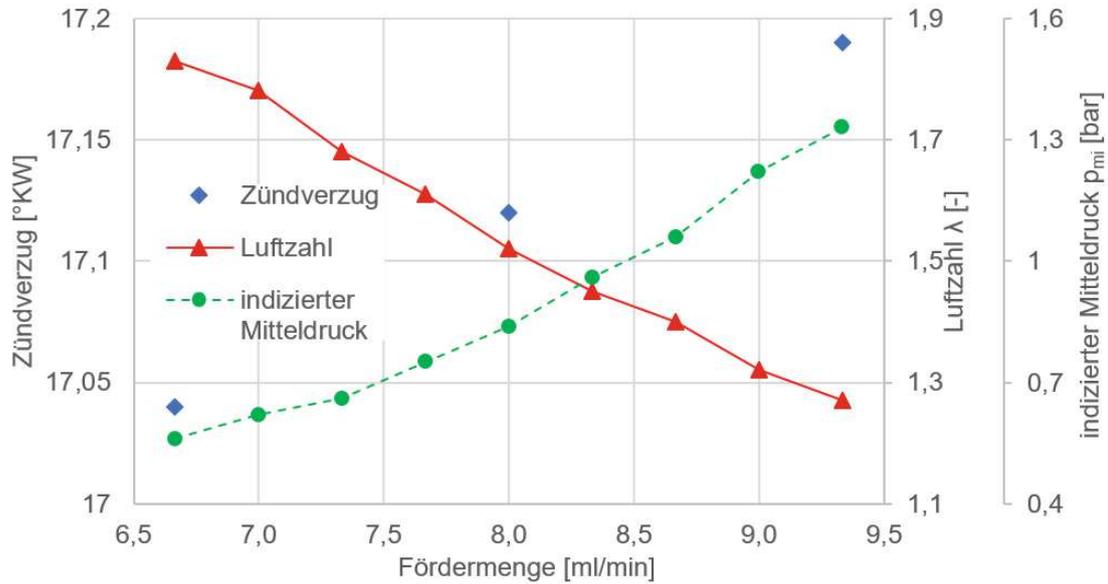


Abb. 4-43: Zündverzug, Luftverhältnis und indizierter Mitteldruck bei unterschiedlichen Einspritzmengen am BASF-Motor

Erst zu einem späteren Zeitpunkt konnte festgestellt werden, dass die bis dahin verwendete Einspritzdüse teilweise große Leckagen zeigt. Die Identifikation der Leckagemenge erweist sich in zweierlei Hinsicht als schwierig. Zum einen ist die Leitung nicht transparent und zum anderen verläuft diese in jenen Sammelbehälter, in welchen zusätzlich die Kraftstoffe beim Ablassen oder Spülen des Messglases hineinfließen, weshalb die vergleichsweise geringen Menge in dem großen Sammelbehältnis kaum wahrgenommen werden. Erst nach Verwendung eines eigenen Messbehältnis konnte die tatsächliche Leckagemenge bestimmt werden. Wie in Abb. 4-44 aufgezeigt, zeigten sich im Mittel Leckageverluste von 5,5 % an den A/N-Referenzkraftstoffen bis zu über 25 % im Falle von Kerosin, was bedeutet, dass lediglich 75 % der Fördermenge tatsächlich in den Brennraum gelangt.

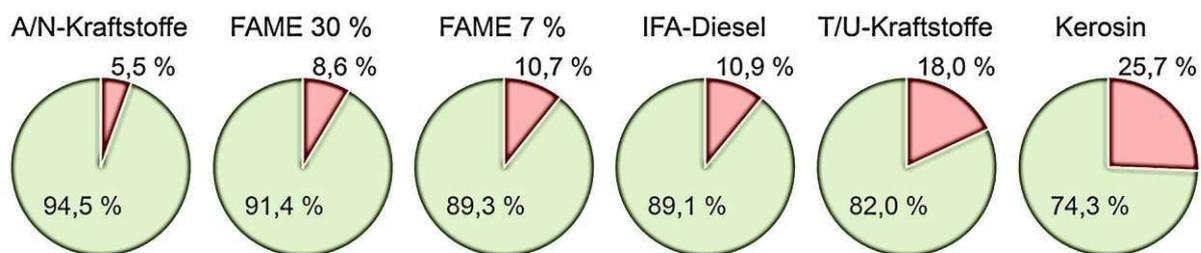


Abb. 4-44: Leckageanteil unterschiedlicher Kraftstoffe

Eine Leckage macht sich auch im Zylinderdruck während der Verbrennung bemerkbar. Durch die geringere Kraftstoffmenge sinkt in weiterer Folge der indizierte Mitteldruck und somit die Leistung. Je nach Kraftstoff waren, bei korrekt eingestellter Fördermenge, Werte von ca. 0,7 bar nachzuweisen. Bei einem derart geringen Mitteldruck läuft der Motor teilweise im Schleppbetrieb, wie sich am Abfall der Drehzahl nach Abschalten des Elektromotors gezeigt hat. Durch die Variation mit unterschiedlichen Einspritzmengen konnte festgestellt werden, dass der Motor ab einem indizierten Mitteldruck von etwa 0,85 bar ohne die Unterstützung weiterläuft.

Aufgrund des Trends von B0/ IFA Diesel über FAME 7 % zu FAME 30 % in Abb. 4-44 lässt sich auch ohne eine vorhandene Messung folgern, dass die Leckmenge für reine FAME-Kraftstoffe geringer sein muss. Der Zusammenhang der Leckageverluste kann mithilfe der Viskosität erklärt werden. Jene Kraftstoffe mit einer höheren Viskosität zeigen demnach geringere Verlust als dünnflüssigere.

Da kurzfristig keine passende Düse zur Verfügung stand, erfolgten weitere Messungen durch eine gezielte Anpassung der Einspritzmenge für die jeweiligen Kraftstoffe. Es konnte gezeigt werden, dass durch die unterschiedlichen Leckageverluste der Kraftstoffe die Cetanzahlen der Messungen mit und ohne Mengenkompensation voneinander abweichen. Diese Erkenntnisse wurden durch den Einbau einer neuen Düse im weiteren Verlauf überprüft und bestätigt. Die Leckagemenge verringerte sich durch den Einsatz einer neuen Düse auf unter 2 % an allen geprüften Kraftstoffen.

Aufbauend auf die vorigen Messungen sollte untersucht werden, ob FAME-Kraftstoffe einen anderen Verlauf in Bezug auf die Einspritzmenge zeigen, als die Referenzkraftstoffe oder fossilen Kraftstoffe. Dazu erfolgte eine weitere Mengenvariation mit IFA-FAME, sowie zweier Referenzkraftstoffe. Für die folgenden Messreihen wurden Referenzkraftstoffe mit größerer Spreizung als in der Norm vorgegeben verwendet, sodass mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden konnte, dass die ermittelten Werte trotz eventueller Abweichungen dazwischen zu liegen kommen.

Abb. 4-45 veranschaulicht die Entwicklung der Ansaugluftmenge über die Einspritzmenge, wobei diese nur in Richtung höherer Einspritzraten verändert wurde. Die Idee dahinter war, dass der Betriebspunkt ebenfalls durch den höheren Mitteldruck in Richtung des CFR-Motors verschoben wird. Es zeigte sich, wie zuvor in Abb. 4-43, dass die Zündverzugszeit mit steigender Einspritzmenge zunimmt, weswegen für die Einhaltung des Zündverzuges der vorgegebenen 20 °KW die Ansaugluftmenge entsprechend erhöht werden musste. Das Verhalten der Referenzkraftstoffe war sehr ähnlich zu jenem des FAME-Kraftstoffes, weshalb sich die ermittelten Cetanzahlen kaum unterschieden.

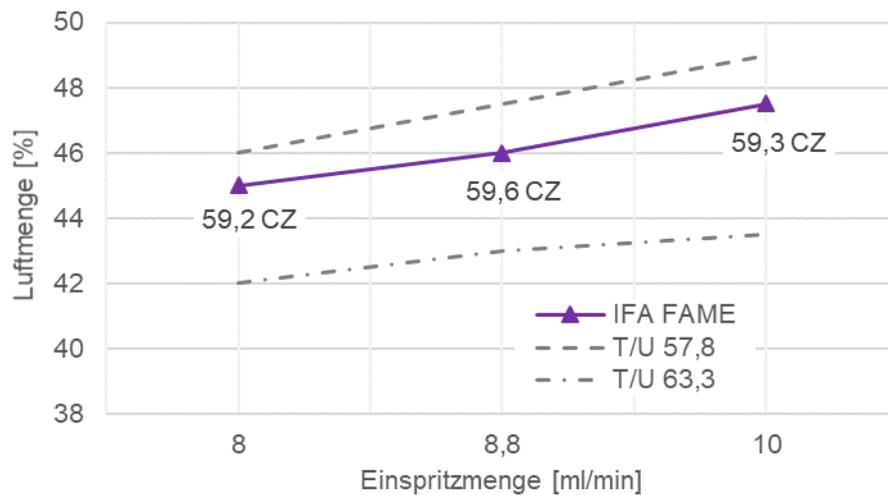


Abb. 4-45: Ermittelte Luftmenge über die Einspritzmenge am BASF für IFA-FAME und zwei Referenzkraftstoffe

Mit steigender Einspritzmenge nimmt die Zündverzugszeit aufgrund der größeren Menge unverdampften Kraftstoffes und dem niedrigen Temperaturniveau, bedingt durch die höhere Verdampfungsenergie im Strahl, zu [18].

Mit Hilfe von Abb. 4-45 lassen sich weiters die Differenzen der Cetanzahlen durch die defekte Düse erklären. Durch unterschiedliche Einspritzmengen aufgrund von Leckagen verhält sich die notwendige Luftmenge entsprechend anders, was sich folglich in einer verfälschten Cetanzahl auswirkt.

4.7.2 Variation des Einspritzzeitpunktes

Wie bereits in Kapitel 2.3.5 erwähnt, hat auch der Einspritzzeitpunkt einen Einfluss auf den Zündverzug. Da die Einspritzung der beiden Motoren zu deutlich unterschiedlichen Zeitpunkten (CFR: 13 °KWvOT, BASF: 20 °KWvOT) erfolgt, wurden Versuche durchgeführt, um den tatsächlichen Einfluss des Einspritzzeitpunktes festzustellen. Dabei wurden die Einspritzzeitpunkte am BASF sukzessive von früh in Richtung OT (spät) gestellt. Weiterhin fixiert wurde der Brennbeginn im OT, wodurch sich der Zündverzug entsprechend ändert. In [Abb. 4-46](#) sind die erforderlichen Luftmengen für die beiden Referenzkraftstoffe und IFA-FAME über den Zeitpunkt der Einspritzung aufgetragen.

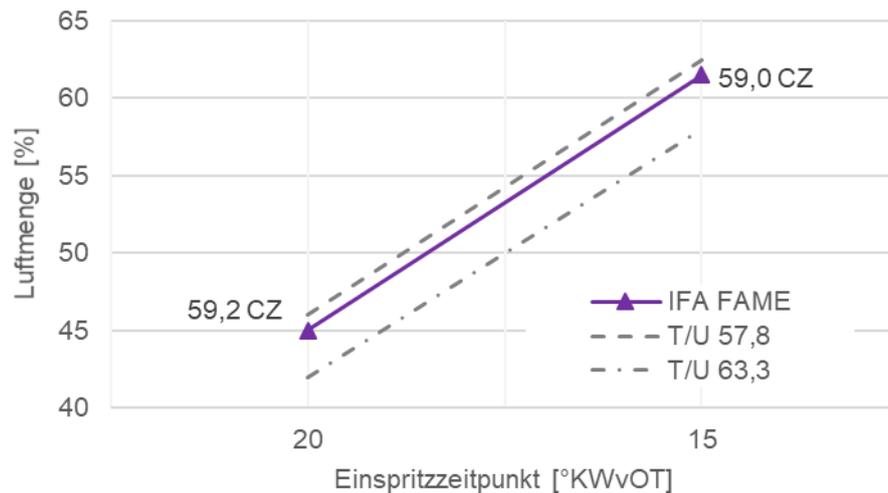


Abb. 4-46: Ermittelte Luftmenge über den Einspritzzeitpunkt am BASF für IFA-FAME und zwei Referenzkraftstoffe

Durch den immer kürzer werdenden Zündverzug, infolge des späteren Einspritzbeginnes ist ein höherer Luftaufwand im Brennraum notwendig, wie in Abb. 4-46 zu sehen ist. Durch die gleichmäßige Zunahme der Luftmenge sowohl der FAME- als auch der Referenzkraftstoffe kann darauf geschlossen werden, dass eine Änderung des Einspritzzeitpunktes zu keiner Veränderung der Cetanzahl führt.

Abb. 4-47 zeigt die Zylinderdruckkurve für die in Abb. 4-46 ermittelten Luftmengen, sowie die beiden zugehörigen Heizverläufe für einen Einspritzvorgang bei 20 °KWvOT und 15 °KWvOT. Bei der durchgezogenen roten und der punktierten grünen Linie handelt es sich um die Mittelwerte bei einem Einspritzzeitpunkt von 15 °KWvOT über 200 Zyklen, während die blau strichlierte Linie einen Einzelzyklus bei einer Voreinspritzung von 15 °KWvOT zeigt. Man kann erkennen, dass die zuvor in Kapitel 4.6 erwähnte spätere Einspritzung zu einer „weicheren“ Verbrennung führt, das sich insbesondere am Heizverlauf bemerkbar macht. Dies wird auch durch Kurve des Einzelzyklus bestätigt, welche hinzugefügt wurde, um zu verhindern, dass fälschlicherweise davon ausgegangen wird, dass es durch die Mittelwertbildung zu einer Glättung gekommen ist.

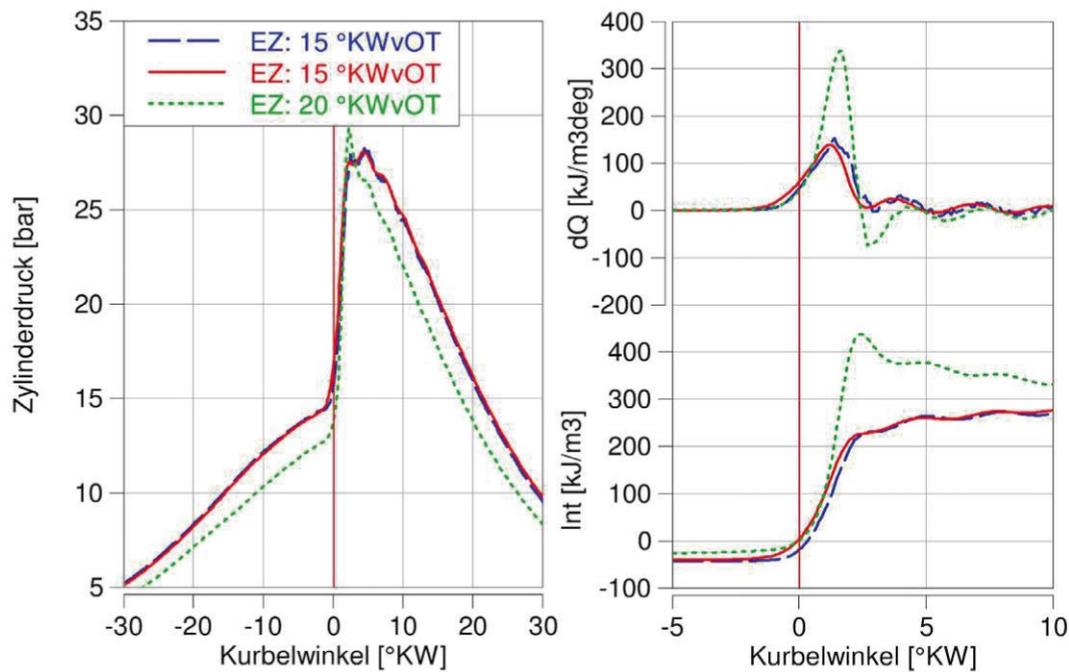


Abb. 4-47: Zylinderdruck und Heizverlauf bei Variation des Einspritzzeitpunktes am BASF bezogen auf Abb. 4-46

Weitere Verschiebungen des Einspritzzeitpunktes nach spät sind aufgrund der mechanischen Begrenzungen durch die Nockenverstellung an der Dieselpumpe nur mit erheblichem Aufwand möglich. Eine zusätzliche Begrenzung stellt auch die maximale Luftmenge dar. Für den Kraftstoff mit einer Cetanzahl von 57,8 CZ ist bei einer Voreinspritzung von 15 °KW bereits eine Luftmenge von knapp 65 % notwendig. Für weniger zündwillige Kraftstoffe steigt demnach die erforderliche Luftmenge entsprechend an.

4.7.3 Variation des Einspritzdruckes

Die ersten Messungen erfolgten noch ohne Fluidquarz, welcher aber kurz darauf nachgerüstet wurde. Es wurde entschieden, den Fluidquarz so nah als möglich an der Einspritzdüse zu installieren. Im Zuge der Umbauarbeiten an einem weiteren Anschlussstück (vgl. Abb. 2-14) wurde festgestellt, dass die beiden einen deutlich unterschiedlichen Aufbau aufwiesen. Im Gegensatz zum zweiten Anschlussstück wies das zu diesem Zeitpunkt noch verbaute Bauteil eine Drosselstelle im Inneren auf. Nach Rücksprache mit den Firmen ROFA und MIBÖ konnte bestätigt werden, dass eine Drossel nicht verbaut gehört.

Es konnte beobachtet werden, dass nach Entfernen der Drossel die Leckagemengen an der Düse deutlich höher ausfielen als zuvor. Zu diesem Zeitpunkt war allerdings noch jene Düse mit der erhöhten Leckage verbaut. Es ist denkbar, dass die Drossel an der Einspritzdüse die Druckspitzen glättet, was wiederum die Leckageverluste reduziert. Am CFR-Motor ist im Einspritzsystem eine Drossel vorgesehen und verbaut.

Nachdem die vorangegangenen Untersuchungen keinen Erfolg brachten, wurde im weiteren Verlauf der Einspritzzeitpunkt variiert. Der Öffnungsdruck der Einspritzdüse am BASF Motor liegt standardmäßig bei 125 bar. Die Änderung erfolgt über die Vorspannung der Feder am Düsenstock. Der erforderliche Druck, den die Feder zum Verschließen des Ventiles aufwenden muss, kann aufgrund des vorherrschenden Zylinderdruckes deutlich höher liegen als der Öffnungsdruck [17]. Eine zu geringe Vorspannung kann dazu führen, dass die Düse zu spät schließt und der Kraftstoff bei einer definierten Kraftstoffmenge über einen langen Zeitraum in den Brennraum „rinnt“, aufgrund der unzureichenden Zerstäubung bedingt durch den reduzierten Geschwindigkeitsgradienten [18]. Dies macht sich insbesondere am COV-Wert bemerkbar und limitiert den Druck nach unten. Die Limitierung nach oben ist hauptsächlich aus bauteilschutztechnischen Gründen vorgegeben. Eine Änderung des Einspritzdruckes erfolgte im laufenden Betrieb, weshalb für die Bestimmung des Einspritzdruckes der maximal auftretende Leitungsdruck unmittelbar vor der Einspritzdüse herangezogen wurde. Der verwendete Fluidquarz, bzw. Verstärker liefert nur Werte bis zu einem maximalen Druck von 155 bar, was in diesem Falle die obere Grenze darstellt.

Während einer Einspritzdruckvariation am BASF-Motor wurde der Druck über einen Bereich von 90 bis 155 bar in 5 bar Schritten variiert. Ohne eine Anpassung sonstiger Parameter konnte festgestellt werden, dass der Zündverzug mit steigendem Druck abfällt. Die Messungen zeigten, dass durch kleinere Drücke mehr Kraftstoff eingespritzt wird, was in weiterer Folge wie schon zuvor erklärt, den Zündverzug beeinflusst.

In [Abb. 4-48](#) erfolgt die Ermittlung der Cetanzahl durch eine Variation des Einspritzdruckes bei korrekt eingestellter Kraftstoffmenge. Diese zeigt die erforderliche Luftmenge für den IFA-FAME und die zugehörigen Referenzkraftstoffe. Es konnte gezeigt werden, dass der Einspritzdruck nur zu einer geringen Änderung der Luftmenge führt, die sich annähernd für alle Kraftstoffe gleich bemerkbar macht. Die bestimmten Cetanzahlen entsprechen in etwa jenen, welche unter Normeinstellungen gemessen wurden, wodurch weitere Untersuchungen in diese Richtung eingestellt wurden.

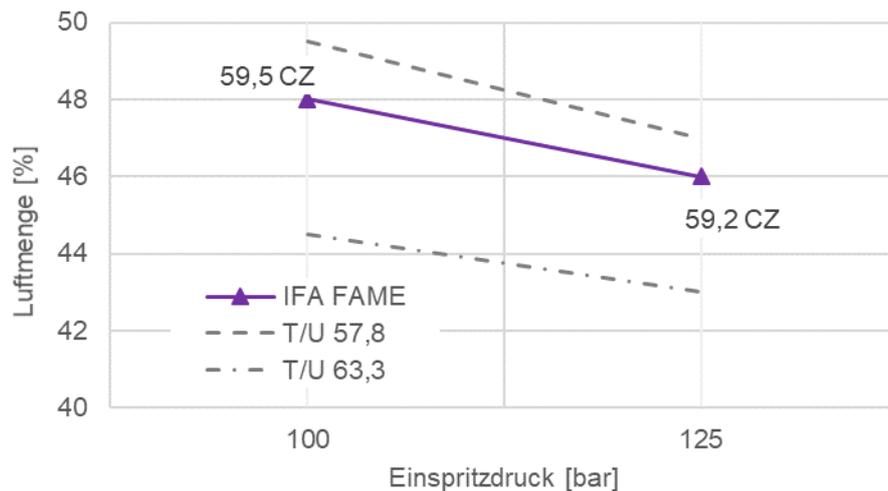


Abb. 4-48: Ermittelte Luftmenge über den Einspritzdruck am BASF für IFA-FAME und zwei Referenzkraftstoffe

Anhand von Versuchen in Modellbrennkammern konnte festgestellt werden, dass mit steigendem Einspritzdruck der Zündverzug ansteigt. Begründet wird dies durch die intensivere Verdampfung, die zu einer schnelleren Gemischbildung führt, wodurch allerdings aufgrund der starken Gemischabkühlung die Zündverzugszeit ansteigt [18].

Entgegen den Versuchen in der Modellbrennkammer kann anhand Abb. 4-48 festgehalten werden, dass die Zündverzugszeit mit sinkendem Einspritzdruck aber konstanter Einspritzmenge am BASF-Motor ansteigt.

4.7.4 Variation der Ansauglufttemperatur

Durch die Temperaturabhängigkeit des Zündverzugs wurde weiters versucht, die beiden Motoren einander anzugleichen.

In Kapitel 4.6 wurden bereits die Unterschiede der Verbrennung untersucht, wobei festgestellt wurde, dass der BASF-Motor zum Zeitpunkt der Einspritzung deutlich höhere Temperaturen aufweist als der CFR-Prüfmotor. Um ähnliche Parameter zu den jeweiligen Einspritzzeitpunkten im Brennraum herzustellen, musste daher die Temperatur der Ansaugluft entweder am CFR-Motor weiter erhöht werden oder am BASF abgesenkt werden. Durch die bereits vorhandene Heizung am CFR-Motor ist eine weitere Aufheizung deutlich einfacher realisierbar als eine Kühlung am BASF, weshalb die nachfolgenden Versuche am CFR-Motor erfolgten.

Für die Untersuchung wurden die fünf FAME-Reinstoffe, der B0 sowie drei Vergleichskraftstoffe herangezogen. Die Einstellungen am Motor erfolgten dabei nach Norm [4], mit Ausnahme der schrittweise erhöhten Ansauglufttemperatur.

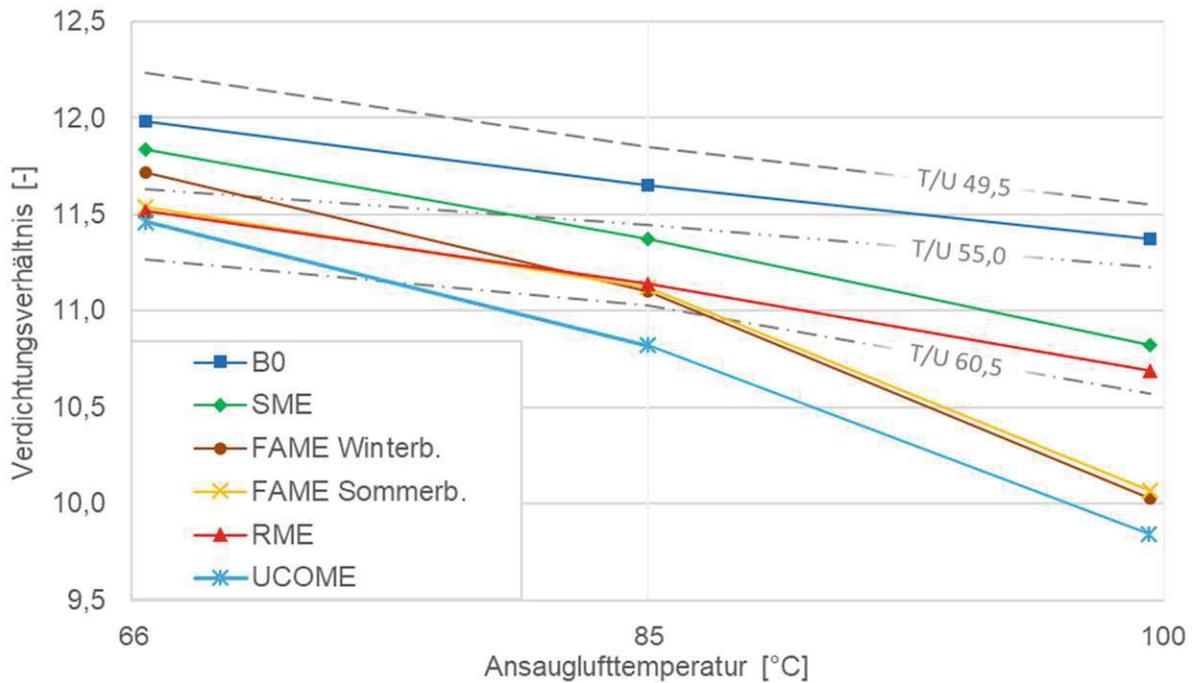


Abb. 4-49: Ermittelte Verdichtung über die Ansauglufttemperatur für die FAME, Referenzkraftstoffe sowie B0 am CFR

In Abb. 4-49 sind die Verdichtungsverhältnisse für die unterschiedlichen Kraftstoffe bei drei verschiedenen Ansauglufttemperaturen eingetragen. Wie zu erwarten war sinkt der Zündverzug mit steigender Ansauglufttemperatur, wodurch das Verdichtungsverhältnis für einen Brennbeginn im OT stetig verringert werden muss. Man kann erkennen, dass die Referenzkraftstoffe, sowie der B0 im Vergleich zu den biogenen Kraftstoffen einen relativ linearen Verlauf aufweisen. Vor allem der FAME - Sommerblend, FAME- Winterblend und der UCOME zeigen hingegen einen deutlich anderen Verlauf. Bei 66 °C liegen diese noch zwischen den Referenzkraftstoffen mit Cetanzahl 55 CZ und 60,5 CZ. Bei höheren Temperaturen liegen dieselben im Bereich geringerer Verdichtungen, was bedeutet, dass deren Cetanzahl ansteigt. Weniger stark sind die Auswirkungen auf SME. Diese zeigen ebenfalls einen Abfall im Diagramm, allerdings nicht so ausgeprägt wie die zuvor genannten.

Ähnlich wie die Referenzkraftstoffe und B0 verhält sich RME, dessen Kurve annäherungsweise konstant verläuft. Dieser Verlauf wird auch durch die ermittelte Cetanzahl bestätigt, da ebendort die Differenz (0,2 CZ) zwischen den beiden Motoren am geringsten ausfallen.

Damit ist fraglich, ob Bedingung 2), welche ein gleiches Verhalten der Referenzkraftstoffe gegenüber den untersuchten Stoffen voraussetzt, aus Kapitel 2.5.2 erfüllt ist, da die Referenzkraftstoffe scheinbar ein anderes Verhalten bezüglich der Temperatur aufweisen, als die meisten hier untersuchten alternativen Kraftstoffe. Derartige Differenzen konnten bereits in anderen Untersuchungen festgestellt werden [16, 18]. Für B0 hingegen scheint diese Bedingung weiterhin erfüllt.

Aus bauteilschutztechnischen Gründen insbesondere an der Heizeinheit, ist es nicht möglich die Temperatur weiter zu steigern. Für eine Ansauglufttemperatur von 66 °C liegt die Stromaufnahme für die Heizung bei ca. 1 A. Für höhere Temperaturen von 100 °C sind dafür bereits Ströme von ca. 2.5 A notwendig.

Die sich bei unterschiedlichen Ansaugtemperaturen ergebenden Cetanzahlen am CFR, sowie die zuvor bestimmten Cetanzahlen am BASF sind in [Tab. 4-5](#) dargestellt. Wie man anhand von [Abb. 4-49](#) erkennen kann, sind Werte zum Teil extrapoliert, was laut Norm nicht zulässig ist, für eine Ersteinschätzung allerdings als ausreichend betrachtet wird.

Tab. 4-5: Cetanzahlen für unterschiedliche Ansauglufttemperaturen der Reinstoffe

Kraftstoff	CFR (66 °C)	CFR (85 °C)	CFR (100 °C)	BASF
	[CZ]	[CZ]	[CZ]	[CZ]
B0	51,7	52,1	52,5	51,5
SME	52,1	56,0	58,3	56,7
FAME Winterblend	53,7	59,6	65,6	57,8
FAME Sommerblend	56,4	59,2	65,2	58,2
RME	56,7	59,0	59,7	56,9
UCOME	57,5	63,5	67,4	62,1

Es konnte gezeigt werden, dass die Cetanzahlen bei einer Ansaugtemperatur von 85 °C am CFR sehr ähnlich zu jenen am BASF sind, trotz der immer noch geringeren Temperatur im Brennraum zum Zeitpunkt des Einspritzvorganges von 850 K im Vergleich zu 950 K am BASF. Mit weiter steigender Ansauglufttemperatur nehmen die Cetanwerte ebenfalls weiter zu. Bei einer Ansauglufttemperatur von 100 °C nehmen diese Werte an, die über jenen des BASF liegen. Die Brennraumtemperatur zum Zeitpunkt des Einspritzvorganges liegt bei ca. 890 K, also noch immer unter dem Niveau des BASF. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass ebenfalls der Zylinderdruck einen nicht unbedeutenden Einfluss auf das Messergebnis hat.

In [Abb. 4-50](#) sind zum einen die Zündverzugszeiten einzelner Säuren, als auch jene von SME, RME und n- Cetan über den Kehrwert der Temperatur eingetragen. Bei den dargestellten Werten handelt es sich ausgenommen der gemessenen Werte von n-Heptan um Berechnungen bzw. Vorhersagen, die mithilfe eines geeigneten Modelles ermittelt wurden.

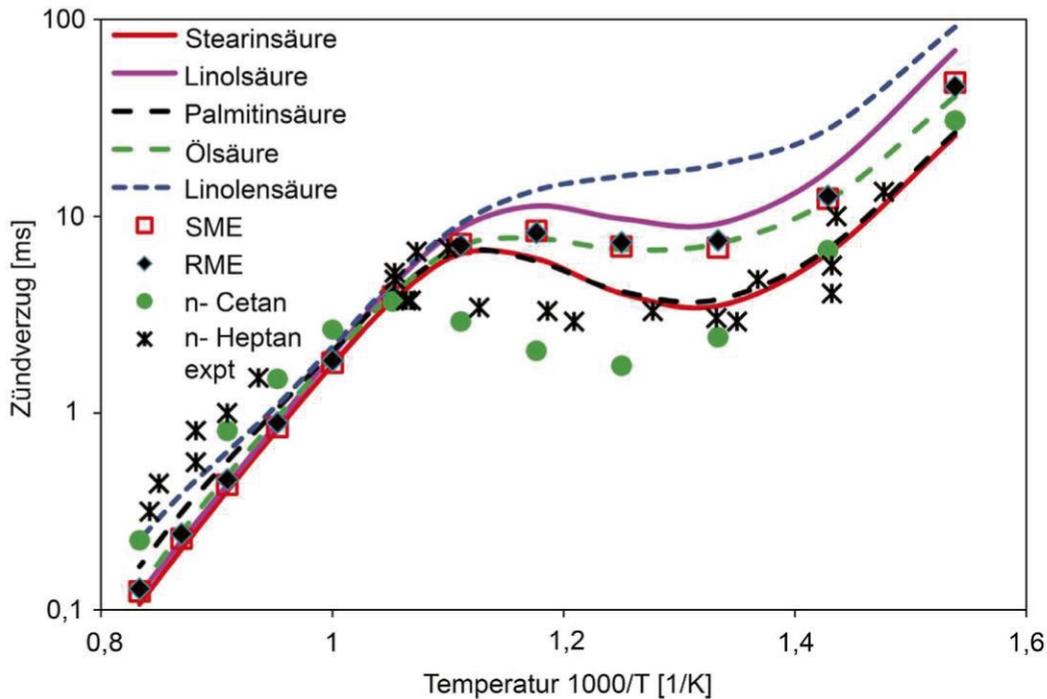


Abb. 4-50: Zündverzug über Kehrwert der Temperatur einzelner Säuren (nachbearbeitet) [44]

Man kann anhand von Abb. 4-50 sehr deutlich erkennen, dass die Zündverzugszeiten bei hohen Temperaturen für alle fünf Säuren auf einem ähnlichen Niveau liegen. Bei niedrigeren Temperaturen, sowie im NTC- Bereich unterscheiden sich diese zum Teil stark. Die Berechnungen beziehen sich allesamt auf ein Luftverhältnis von $\lambda = 1$ und einen vorherrschenden Druck von 13,5 bar.

Für den BASF ergibt sich ein Wert auf der Abszisse von ca. $1,05 \text{ K}^{-1}$ während der CFR bei ungefähr $1,2 \text{ K}^{-1}$ liegt. Diese beiden Werte befinden sich somit genau im NTC-Bereich, woraus ersichtlich ist, dass die jeweiligen Kurven einen deutlich unterschiedlichen Verlauf annehmen, welche somit für die am BASF-Motor höher ermittelten Cetanzahlen verantwortlich gemacht werden könnten.

Es kann festgehalten werden, dass die unterschiedlichen Säuren auch verschiedene Verläufe des Zündverzuges über die Temperatur aufweisen, welche dafür verantwortlich sein könnten, dass auch die Differenzen der Cetanzahlen unterschiedlicher Kraftstoffe zwischen den beiden Motoren nicht ident sind.

Parallel durchgeführte Messungen der Firma ASG an B0, RME und eines Vergleichskraftstoffes mit der Cetanzahl 60 mittels eines Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer (AFIDA), einem Konstantvolumen-Tester (FIT) zeigen, wie in [Abb. 4-51](#) und [Abb. 4-52](#) dargestellt, einen sehr ähnlichen Verlauf. Alle Messungen erfolgten bei einem Kammerdruck von 15 bar. Verändert wurde lediglich die Temperatur in der Kammer, welche bei 500 °C in [Abb. 4-51](#) bzw. 650 °C in [Abb. 4-52](#) liegt.

Für die Ermittlung der Cetanzahl werden nacheinander die verschiedenen Prüf- und Vergleichskraftstoffe in die Brennkammer eingespritzt und der Druckverlauf über die Zeit aufgezeichnet. Für die Bestimmung wird die Zeit herangezogen, bei der ein Schwellenwert des Druckes überschritten wird und mit jener der Vergleichskraftstoffe verglichen. Kraftstoffe die diese Schwelle zu einem früheren Zeitpunkt als der Vergleichskraftstoff erreichen zeigen somit eine höhere Zündwilligkeit und weisen per Definition eine höhere Cetanzahl auf.

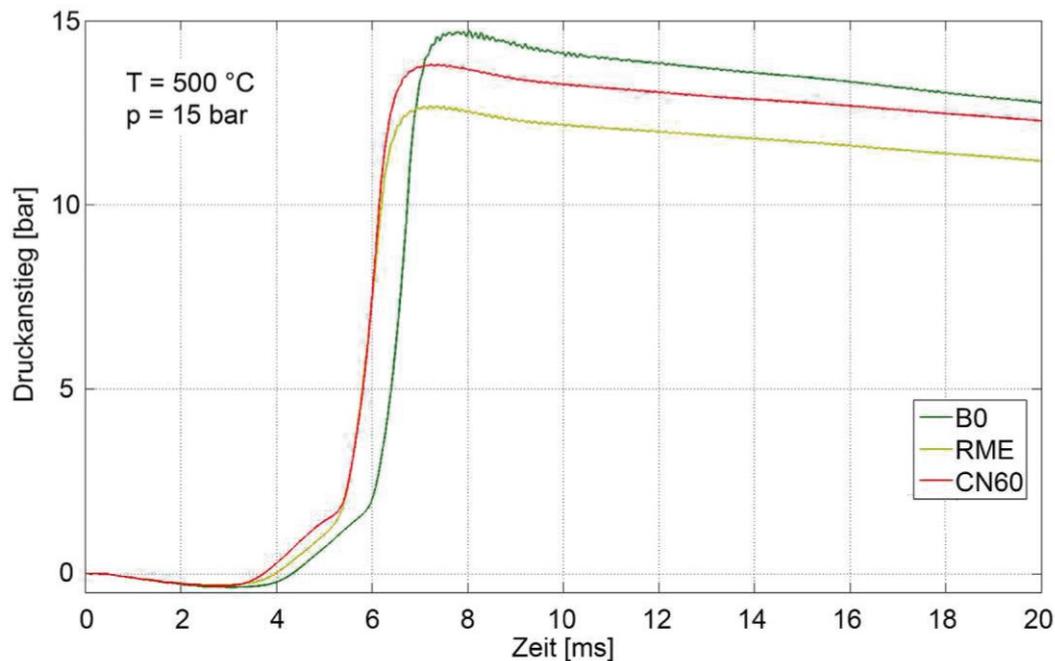


Abb. 4-51: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 500 °C und einem Druck von 15 bar am AFIDA- Messgerät [45]

Es kann anhand von Abb. 4-51 und Abb. 4-52 sowohl festgehalten werden, dass sich die Zündverzugszeit mit zunehmender Temperatur unter konstantem Druck für alle drei Kraftstoffe verkürzt, als auch, dass bei höheren Temperaturen die ermittelte Cetanzahl von RME höher liegt als bei niedrigeren. Während bei Temperaturen von 500 °C die beiden Kurven von RME und dem Vergleichskraftstoff nahezu deckungsgleich sind, ist bei 650 °C eine Differenz der Messkurven zueinander erkennbar. In diesem Fall liegt die Zündverzugszeit von RME unter jener des Vergleichskraftstoffes, was sich in einer höheren Cetanzahl auswirkt und die Ergebnisse der Temperaturvariation am CFR bestätigt.

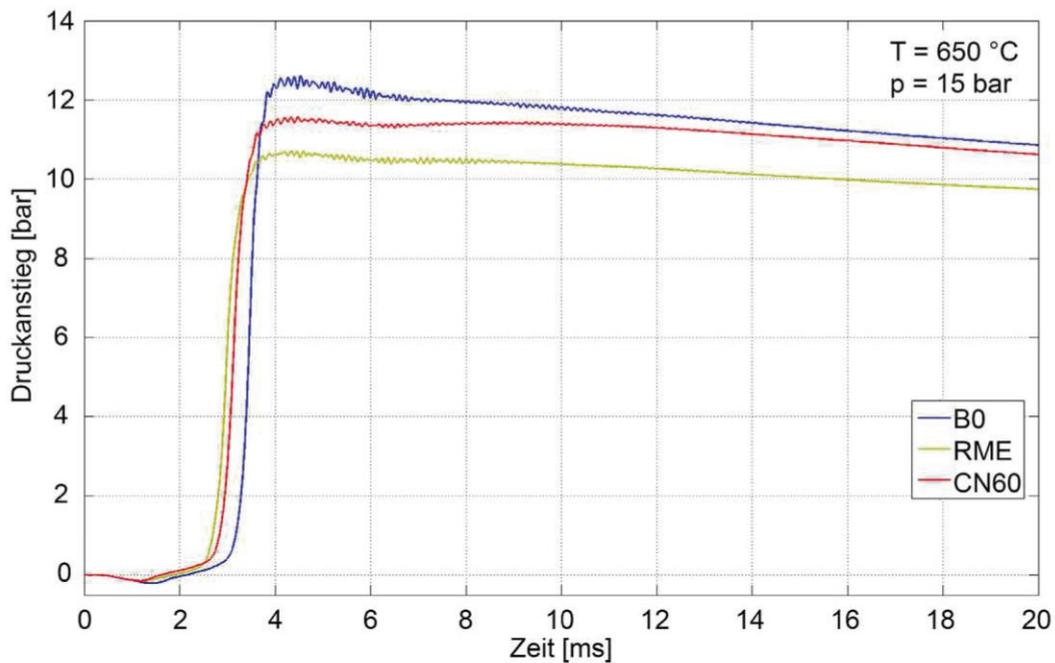


Abb. 4-52: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 650 °C und einem Druck von 15 bar am AFIDA- Messgerät [45]

4.7.5 Androsselung des CFR-Motors

Mit Hilfe des gedrosselten Betriebes des CFR sollte vorrangig überprüft werden, ob die Brennraumtemperaturen des BASF durch ein höheres Verdichtungsverhältnis herbeigeführt werden könnte. Durch eine eigens dafür entwickelte Drossel sinkt der Zylinderdruck, was den Betriebsbedingungen des BASF näherkommt. Diese Drossel sollte bestimmte Bedingungen erfüllen. Sie muss variabel gestaltet, in das bereits vorhandene System integrierbar und zudem schnell und einfach zu realisieren sein. Die Drossel wurde am Flansch zwischen Zylinderkopf und Ansaugrohr angebracht, wie in [Abb. 4-53](#) zu sehen ist. Durch die Verschiebung des oberen Blechteiles ändert sich entsprechend der Öffnungsspalt, wodurch der Öffnungsquerschnitt im Vergleich zum Originalzustand von 95,7 % bis auf 0 % ([Abb. 4-53c](#)) reduziert werden kann.

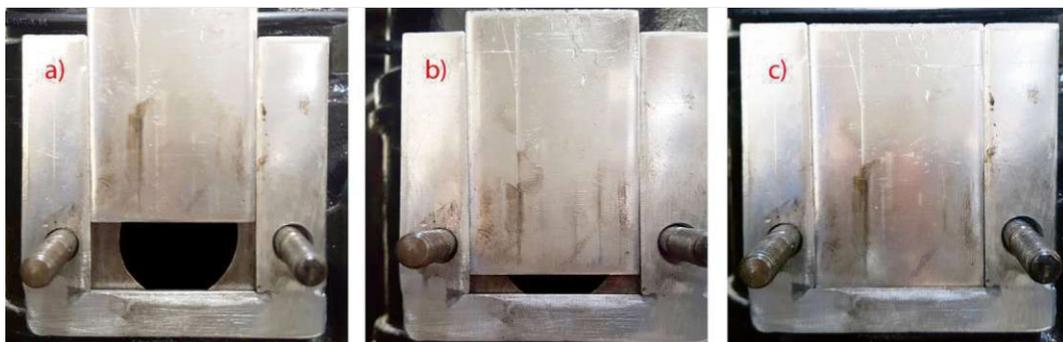


Abb. 4-53: Drosselstelle am CFR-Motor, Öffnungsquerschnitt a) 60 %, b) 10 %, c) 0 %

Durch die teilweise hohe Drosselung der Ansaugluft variierte das Verhältnis Kraftstoffmenge zu Luftmenge bei Einstellung nach Norm deutlich und führte zu sehr fetten Gemischen. Um einen relativ konstanten Motorlauf zu garantieren erfolgte die Regelung der Kraftstoffmenge über das sich einstellende Luftverhältnis. Für die Versuche wurde ein Wert von 1,5 festgelegt.

Abb. 4-54 zeigt den vorherrschenden Zylinderdruck im Ansaugtrakt und die Temperaturen im Bereich der Einspritzung. Der Saugrohrdruck für den CFR nach Normeinstellungen (CFR Norm), sowie mit einer Ansauglufttemperatur von 100 °C (CFR 100 °C) beide jedoch ohne Androsselung, weisen einen deutlich höheren Wert auf als der BASF-Motor unter Normeinstellungen (BASF Norm). Es ist weiters zu sehen, dass durch den Einbau der Drossel der Ansaugdruck entsprechend abnimmt. Weder bei einer Drosselöffnung von 10,5 % noch bei 3,5 % kann der Ansaugdruck des BASF erreicht werden. An den Temperaturverläufen kann man erkennen, dass durch die Erhöhung der Ansauglufttemperatur um 34 °C wie in Kapitel 4.7.4, die Temperatur zum Zeitpunkt der Einspritzung um ca. 50 °C ansteigt. Um eine Zündung im OT zu erreichen, muss mit zunehmender Androsselung das Verdichtungsverhältnis erhöht werden, wodurch es zu einer weiteren Steigerung der Temperatur im Brennraum kommt.

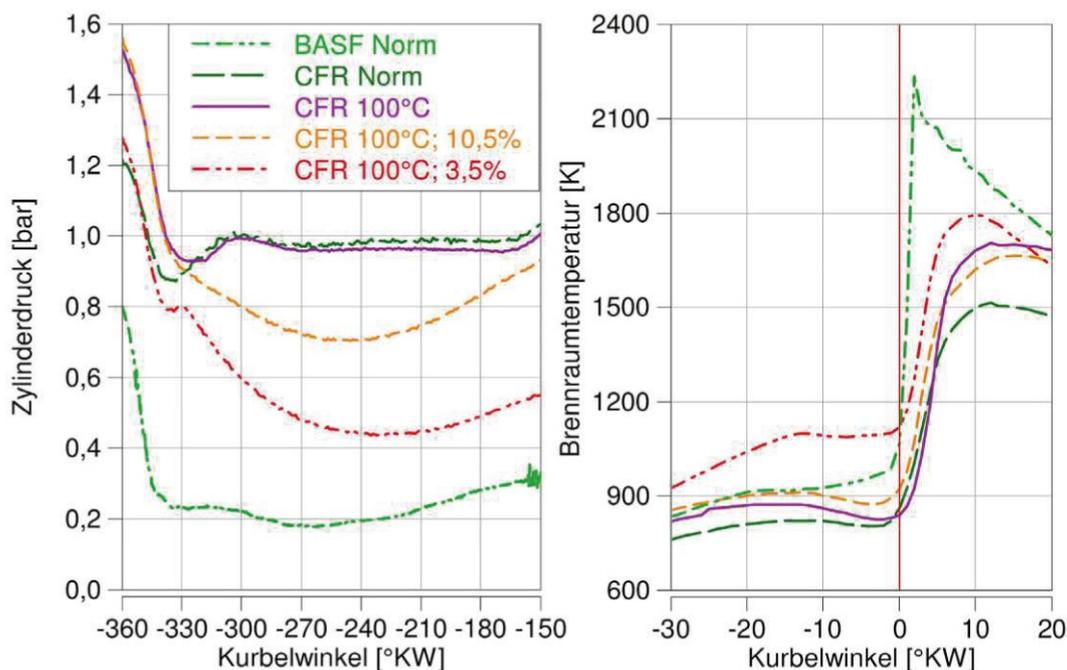


Abb. 4-54: Zylinderdruck- und Brennraumtemperatur während der Parametervariation mittels B0

Aufgrund der geringeren Druckverhältnisse, sowie der geringeren Kraftstoffmenge sinkt der indizierte Mitteldruck deutlich ab. Während bei Standardmessungen noch Werte von über 4 bar erreicht werden, liegen diese bei einem Öffnungsquerschnitt von

3,5 % unter den Werten des BASF. Der COV-Wert des Motors verschlechtert sich ebenfalls und liegt bei einem Wert von über 15 %.

Eine vergleichende Messung mit den zuvor ermittelten Ergebnissen ist nicht sinnvoll, da zu viele Parameter auf einmal verändert wurden und damit keine eindeutige Aussage getroffen werden kann.

Von der Firma ASG wurden weitere Versuche bei konstanter Temperatur aber unterschiedlichen Drücken am AFIDA-Messgerät durchgeführt, deren Ergebnisse in [Abb. 4-55](#) und [Abb. 4-56](#) für eine Temperatur von 650 °C und einem Kammerdruck von 10 bzw. 20 bar aufgetragen sind. Zu erkennen ist, dass sich mit zunehmendem Druck die Zündverzugszeit der untersuchten Kraftstoffe reduziert.

Weiters kann man in [Abb. 4-55](#) sehen, dass RME eine kürzere Zündverzugszeit aufweist als der Referenzkraftstoff mit einer Cetanzahl von 60 CZ und damit definitionsgemäß eine höhere Cetanzahl. Im Vergleich dazu kann man bei einem höheren Kammerdruck, wie in [Abb. 4-56](#) gezeigt, erkennen, dass die Messkurven der beiden zuvor genannten Kraftstoffe deckungsgleich sind und somit dieselbe Cetanzahl aufzeigen, wodurch RME ebenfalls mit einer Cetanzahl von 60 CZ bewertet wird. Es kann somit festgehalten werden, dass sich mit zunehmendem Kammerdruck einerseits die Zündverzugszeit aller Kraftstoffe verkürzt, als auch, dass die ermittelte Cetanzahl für RME abfällt.

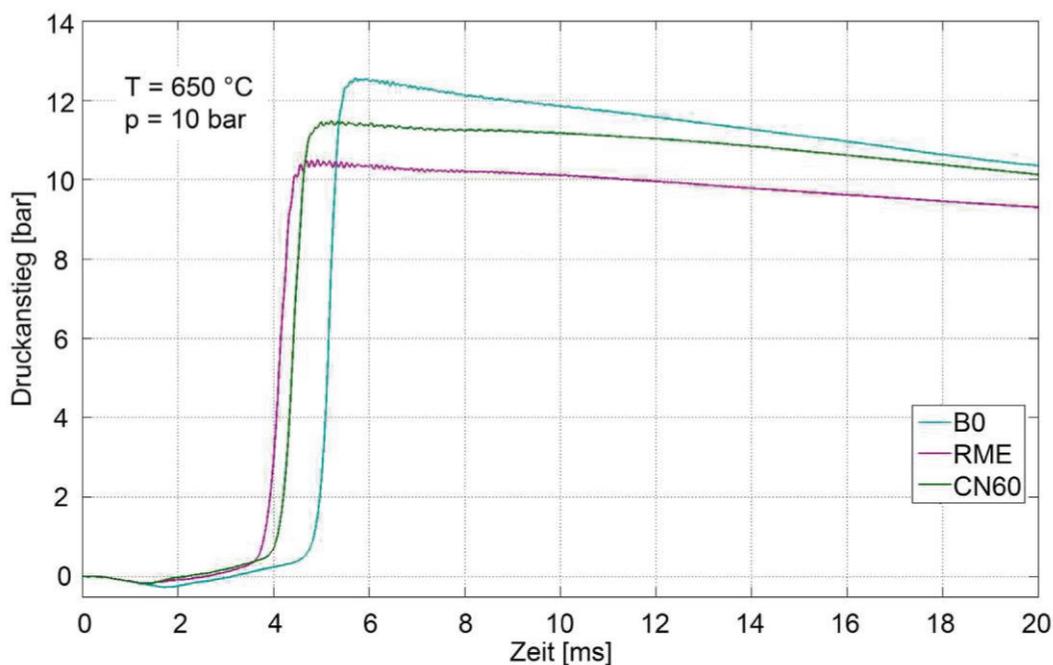


Abb. 4-55: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 650 °C und einem Druck von 10 bar am AFIDA- Messgerät [45]

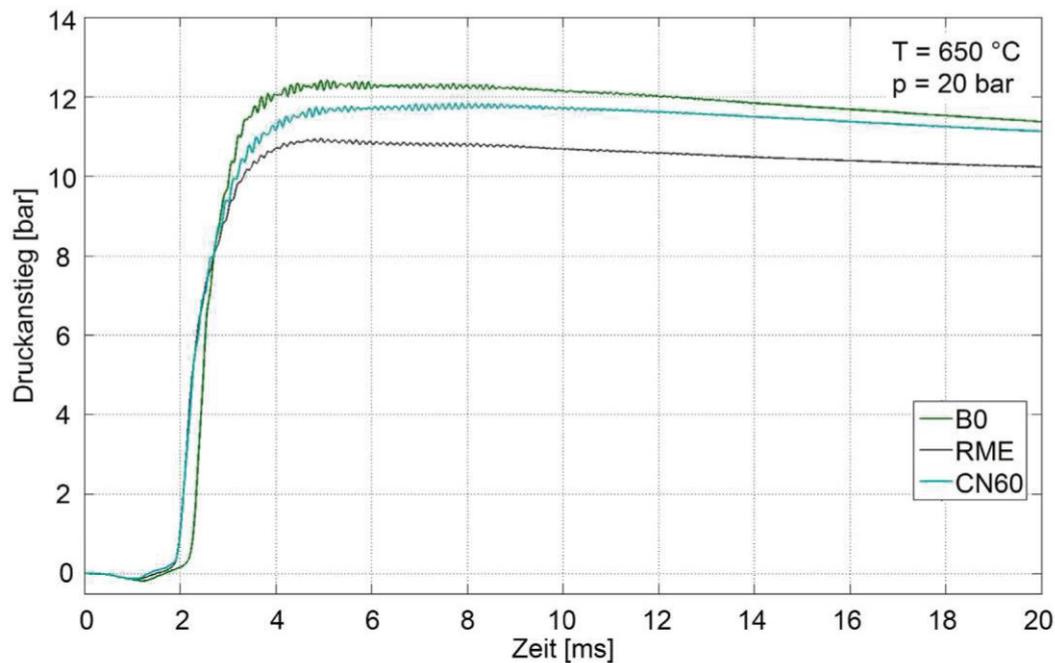


Abb. 4-56: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 650 °C und einem Druck von 20 bar am AFIDA- Messgerät [45]

Wie zuvor bereits erwähnt weist der CFR-Prüfmotor trotz höherer Temperaturen im Brennraum zum Zeitpunkt der Einspritzung eine geringere Zündverzugszeit als der BASF auf. Dies kann mithilfe der Erkenntnisse aus den Versuchen am AFIDA erklärt werden, da bei geringeren Drücken, wie sie am BASF aufgrund der Androsselung vorherrschen, die Zündverzugszeit ansteigt.

In [Tab. 4-6](#) sind die Auswirkungen, wie sie an AFIDA für unterschiedliche Brennraumdrücke und Temperaturen auf die ermittelte Cetanzahl für RME festgestellt werden konnten, noch einmal zusammengefasst.

Tab. 4-6: Auswirkungen unterschiedlicher Brennraumbedingungen auf ermittelte Cetanzahl von FAME-Kraftstoffen

Cetanzahl	Temperatur	Druck
↓	↓	↑
↑	↑	↓
↓ sinkt ↑ steigt		

Wie anhand von [Tab. 4-6](#) ersichtlich, kann mit zunehmender Temperatur, sowie sinkendem Druck im Brennraum eine höhere Cetanzahl der FAME-Kraftstoffe erreicht werden, wodurch die Unterschiede in der Bewertung der Cetanzahl der beiden Motoren erklärt werden kann.

5 Diskussion

Im Zuge einer technischen Untersuchung am BASF-Motor konnten einige fehlerhafte oder falsch verbaute Teile identifiziert werden, wobei nicht auszuschließen ist, dass weitere mögliche Mängel dabei unentdeckt blieben, die einen Einfluss auf die Ergebnisse haben könnten.

Neben dem Einspritzzeitpunkt, der zwischen Analoganzeige des BASF-Motor und Indiziersystem nicht übereinstimmte, der eingebauten Drossel im Bereich der Einspritzdüse, sowie der defekten Einspritzdüse, die zuvor genau analysiert wurde und einen direkten Einfluss auf die Messungen darstellt, konnten zwei weitere Probleme aufgedeckt werden. Zum einen wurde während der ersten Messungen festgestellt, dass die Kühlleitungen für die Motorkühlung durch Schmutzablagerungen verunreinigt waren, sodass eine Zirkulation des Kühlwassers nicht möglich war. Die Temperaturen lagen dabei um 20 °C höher als die Norm vorschreibt.

Weiters wurden im Bereich der Unterdruckmessung an der Venturidüse diverse Undichtigkeiten festgestellt. Diese äußerten sich durch geringer erforderlichen Luftmengen am Luftmengenmesser, auch für sehr zündunwillige Kraftstoffe. Durch eine neuerliche Abdichtung konnte dieser Fehler behoben und die Spreizung leicht angehoben werden, was einen Fehler aufgrund der Ablesbarkeit reduzieren kann.

Anhand der Messungen konnte gezeigt werden, dass der BASF- und der CFR-Motor je nach Kraftstoff zum Teil deutliche Unterschiede der Cetanzahl aufzeigen. Für die rein fossilen Kraftstoffe stimmten die ermittelten Werte relativ gut überein. Die Bewertungen für Dieselkraftstoffe mit geringem bis mittleren Anteil an biogenen Kraftstoffen, sowie Kraftstoffen mit höheren Konzentrationen an Zündbeschleunigern zeigen aber eine Differenz in den Messergebnissen.

In der Literatur wird angegeben, dass der BASF-Motor um ca. 1,5 Einheiten zu hoch bewertet [12]. Die Messergebnisse in dieser Arbeit konnten dies allerdings nur zum Teil bestätigen. Differenzen in diesem Ausmaß konnten lediglich bei den ermittelten Cetanzahlen reiner FAME-Kraftstoffe festgestellt werden, welche am BASF höher bewertet werden als am CFR. Die festgestellten Unterschiede der FAME-Reinstoffe variierten ebenfalls zwischen den Kraftstoffen.

Für die FAME-Kraftstoffe konnte festgestellt werden, dass diese bei verschiedenen Temperaturen ein anderes Verhalten bezüglich der Zündverzugszeit aufzeigen, als die Referenzkraftstoffe oder ein rein fossiler Kraftstoff. Durch eine Variation der Ansauglufttemperatur wurden Temperaturbedingungen im Brennraum des CFR geschaffen, welche an jenen des BASF angenähert sind. In diesem Bereich zeigte sich, dass die so ermittelten Cetanzahlen deutlich höher ausfallen, als im Betrieb unter Normeinstellungen. Durch Änderung der Betriebsparameter im Bereich der

Ansauglufttemperatur am CFR konnten die Cetanwerte der FAME-Kraftstoffe an jene des BASF angenähert werden.

Schon der grundlegende Aufbau der beiden Motoren unterscheidet sich enorm. Zwar sind beide als Kammermotoren ausgeführt, jedoch haben sowohl der Vorkammermotor im Falle des CFR- als auch der Wirbelkammermotor unterschiedliche Einflüsse auf die Verbrennung und insbesondere auf die Gemischbildung.

Mögliche Anpassungen des BASF an den CFR gestalten sich aufgrund der unterschiedlichen konstruktiven Auslegung der beiden Motoren schwierig. Des Weiteren ist kaum abzusehen, wie sich eine Änderung diverser Parameter auf die Messergebnisse in Bezug auf die Cetanzahl durch Wechselwirkungen innerhalb des Motors auswirken. Eine Änderung an einem Parameter führt unweigerlich zu einer Reaktion, die eine Anpassung von zumindest einem weiteren erfordert. Erschwerend kommt hinzu, dass eine Vielzahl an Faktoren eine Auswirkung auf die Zündverzugszeit zeigen.

Änderung am BASF die möglicherweise zu einem Angleich der Motoren führen könnten sind:

Verdichtungsverhältnis:

Die Messungen am CFR-Motor zeigten, dass sich das einzustellende Verdichtungsverhältnis deutlich unter dem fixen Verdichtungsverhältnis für den BASF befindet. Die Überlegung war durch ein geringeres Verdichtungsverhältnis am BASF die Temperaturen im Brennraum entsprechend abzusenken.

Das Problem, welches dabei auftreten könnte, liegt darin, dass Kraftstoffe mit einer geringeren Cetanzahl durch den erhöhten Luftaufwand nicht mehr messbar sind, wodurch der Einsatzbereich eingeschränkt werden würde. Ein geringeres Verdichtungsverhältnis erfordert jedoch einen merklichen Aufwand und ist deshalb schwieriger umzusetzen.

Ansaugluftkonditionierung

Wie erwähnt liegen die Brennraumtemperaturen am BASF höher. Durch eine Kühlung der Ansaugluft sinkt bei gleichem Verdichtungsverhältnis über den gesamten Bereich das Temperaturniveau ab. Wie in Kapitel 4.3 dargestellt sind für geringere Ansauglufttemperaturen entsprechend höhere Luftmengen erforderlich. Eine Aussage, welche Temperaturen für die Ansaugluft notwendig sind, dass sich dieselben Zustandsgrößen im Brennraum einstellen wie am CFR, kann nicht getroffen werden. Aufgrund des konstanten Zündverzuges führt eine Änderung der Temperatur unweigerlich zu einer Änderung des Zylinderdruckes bedingt durch die Einstellung mittels Drosselventil. Es ist allerdings denkbar, dass durch die Reduzierung der

Ansauglufttemperatur und die damit verbundene Entdrosselung des Motors ähnliche Zustände im Brennraum herrschen wie am CFR.

Entdrosselung

Für eine weitere Möglichkeit die Parameter im Brennraum des BASF-Motors in Richtung jener des CFR zu bringen, könnte eine Entdrosselung des Motors in Frage kommen. Mithilfe der idealen Gasgleichung (Formel (5-1)) kann gezeigt werden, dass bei einer höheren Ladungsmasse die Temperatur entsprechend abfällt. Somit sinkt die Temperatur bei einer gleichzeitigen Erhöhung des Zylinderdruckes.

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (5-1)$$

p	Druck	[Pa]
V	Volumen	[m ³]
m	Masse	[kg]
R	Spezifische Gaskonstante	[J/kgK]
T	Temperatur	[K]

Aufgrund der höheren Luftmasse, welche beim BASF-Motor als Beurteilungskriterium für die Cetanzahl herangezogen wird, muss für einen Brennbeginn im OT der Einspritzzeitpunkt entsprechend nach spät gestellt werden. Ein weiteres Problem das sich ergeben kann ist, dass sehr zündwillige Kraftstoffe durch den kürzeren Zündverzug nicht mehr vermessen werden können.

Angesichts der vielen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen untereinander auf den Zündverzug und die innermotorischen Parameter ist es nicht möglich eine Aussage zu treffen, welche Änderungen an welchen Parametern vorzunehmen sind, um am BASF dieselben Cetanzahlen wie am CFR zu ermitteln.

6 Zusammenfassung

Motivation dieser Diplomarbeit waren Unterschiede bei der Bestimmung der Cetanzahl zwischen dem CFR- und dem BASF-Verfahren, vor allem bei Kraftstoffen mit hohem FAME- bzw. Zündbeschleunigergehalt aufzuzeigen.

Für die Untersuchungen wurden neben den originalen am jeweiligen Motor vorhandenen Sensoren noch weitere verbaut. Dazu zählen Temperatursensoren, Lambdasonden aber auch die für die Indizierung notwendigen Sensoren, wie Indizierquarz und Winkelmarkengeber.

Ein grundlegender Unterschied der beiden Motoren liegt zunächst in der konstruktiven Auslegung dieser. Zwar sind beide Motoren Kammer-Dieselmotor, allerdings handelt es sich beim CFR-Motor um eine Vorkammer, wohingegen der BASF als Motor mit Wirbelkammer ausgeführt ist.

Durch die Vermessung unterschiedlicher Kraftstoffe konnte, wie erwartet, festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Cetanzahl für fossile Kraftstoffe zwischen den beiden Motoren keine signifikanten Unterschiede aufzeigten. Die Bewertung für den B0-Kraftstoff ergab dabei einen Mittelwert von 51,7 CZ mit einer Standardabweichung von 0,59 CZ am CFR. Am BASF stellte sich ein Mittelwert von 51,5 CZ und eine Standardabweichung von 0,31 CZ ein.

Ebenfalls eine geringe Abweichung der Messergebnisse zeigte sich bei allen fünf B7-Kraftstoffmischungen, wobei ebenda der BASF-Prüfmotor marginal geringer bewertet als der CFR. Festzuhalten ist außerdem, dass sich durch die Beimischung von 7 % biogener Kraftstoffe die Cetanzahl am CFR mehr in Richtung höherer Werte ändert als am BASF. Am CFR stieg die Cetanzahl im Mittel um ca. 0,9 CZ, während am BASF eine Erhöhung von nur 0,4 CZ zu verzeichnen war. Lediglich die UCOME-Mischung zeigten bei letztgenanntem einen Anstieg von ebenfalls 0,9 CZ. Bei UCOME (used cooking oil methyl ester) handelt es sich um FAME aus diversen Altspeiseölen.

Im Bereich der Kraftstoffmischung mit einem biogenen Anteil von 30 % waren bereits deutlich größere Unterschiede in der ermittelten Cetanzahl zum Grundkraftstoff zu erkennen. Die dabei gemessenen Werte liegen bei beiden Motoren ebenfalls annäherungsweise auf demselben Niveau bei einem Wert von 52,6 CZ für den SME und bis zu 54,6 CZ für den UCOME als Mittelwert für die beiden Motoren.

Die reinen FAME Kraftstoffe zeigen im Vergleich zu den zuvor genannten Kraftstoffmischungen zum Teil eine deutliche Differenz in der ermittelten Cetanzahl. Lediglich die Zündwilligkeit von RME wurde an beiden Motoren ähnlich bewertet. Die übrigen Kraftstoffe hingegen wiesen Unterschiede von bis zu 4,6 CZ zwischen den Motoren auf. Die größten Differenzen zeigten sich dabei bei SME und UCOME, wobei letztgenannte am BASF Cetanzahlen von über 62 CZ erreichte.

Durch Messungen von Kraftstoffen mit unterschiedlichen Konzentrationen an Zündbeschleunigern konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Motoren festgestellt werden. Die Ergebnisse der Messungen zeigten eine maximale Abweichung von 1,3 CZ auf, was innerhalb der Messtoleranzen liegt. Bei geringen Konzentrationen zeigte sich, dass der CFR-Motor etwas empfindlicher auf diese reagiert, als der BASF, wohingegen bei höheren Konzentrationen (2 500 ppm) kaum Abweichungen zu verzeichnen waren.

Im Zuge der Messungen konnte beobachtet werden, dass die in der Norm genannte Vorgehensweise zur Ermittlung der Cetanzahl am BASF-Motor mit Hilfe einer Kalibrierkurve teilweise deutliche Unterschiede in der Cetanzahl mit sich brachte. Grund dafür ist mit großer Wahrscheinlichkeit die Temperatur der Ansaugluft, die trotz langer Warmlaufphasen von bis zu zwei Stunden stetig weiter stieg und nicht auf einem konstanten Niveau blieb, im Gegensatz zum CFR, dessen Ansaugluft vorkonditioniert wird.

Voraussetzung für exakte Cetanzahlen ist ein gewissenhaftes und genaues Vorgehen an den beiden Motoren, wobei die erschwerte Ablesbarkeit der Analoggeräte am BASF größere Fehlerquellen mit sich bringen kann. Durch den Einsatz des computergestützten Betriebs- und Auswertesystems CETANMASTER 2 der Firma MIBÖ können in Zukunft sowohl die Genauigkeit, die Übersichtlichkeit und die Geschwindigkeit verbessert werden [46]. Trotz der schwierigeren Ablesbarkeit wurden sowohl die Grenzen der Wiederholbarkeit als auch der Reproduzierbarkeit nicht überschritten, welche niedriger liegen als am CFR-Prüfmotor. Ein Grund für die größeren Schwankungen am CFR könnte die Einspritzdüse darstellen, welche deutlich anfälliger auf Verkokungen, wie sie sich während des Betriebes an der Düsennadel bilden, reagiert. Diese können die Gemischbildung wesentlich beeinflussen und haben somit einen direkten Einfluss auf den physikalischen Zündverzug, weshalb der Motor auf derartige Verschmutzungen, die bei rein biogenen Kraftstoffen höher ausfallen, empfindlicher reagieren. Anhand diverser Versuche konnte festgestellt werden, dass die Auswirkungen von FAME-Kraftstoffen auf den Verschmutzungsgrad der Düse einen wesentlichen Einfluss darstellen.

Mithilfe der Indizierdaten konnte weiters festgestellt werden, dass die Parameter im Brennraum zum Zeitpunkt der Einspritzung deutlich unterschiedliche Werte annehmen. Wie durch die Androsselung des BASF zu erwarten war, liegt der Druck zu Beginn der Einspritzung deutlich niedriger als jener des CFR, wohingegen die Temperaturen im Brennraum bei letztgenannten um bis zu 150 °C geringer liegen.

Mittels einer Variation der Ansauglufttemperatur am CFR-Motor konnte gezeigt werden, dass diese sich entscheidend auf die ermittelte Cetanzahl auswirkt, was durch entsprechende Messungen am AFIDA-Messgerät durch die Firma ASG bestätigt

werden konnte. Durch höhere Ansauglufttemperaturen war es möglich die am CFR ermittelte Cetanzahl auf ein ähnliches Niveau des BASF-Motors zu heben und sogar zu übertreffen. Die Begründung liegt darin, dass die Temperaturen in den beiden Brennräumen in den NTC-Bereich der jeweiligen Kraftstoffe fallen. Der NTC (negative temperature coefficient) beschreibt dabei ein Phänomen, welches bei vielen Kraftstoffen mit unterschiedlichen Ausprägungen auftritt. Innerhalb dieses Bereiches ist zu erkennen, dass die Zündverzugszeit trotz steigender Ausgangstemperatur zunimmt. Es konnte gezeigt werden, dass sich dieses Verhalten nicht bei allen Kraftstoffen gleich äußert, sondern je nach Zusammensetzung einen unterschiedlichen Verlauf annimmt, weshalb manche stärker auf eine geänderte Temperatur reagieren. Dies erklärt, warum die Differenzen der Kraftstoffe an beiden Motoren unterschiedlich ausfallen und nicht dieselben Abweichungen aufzeigen.

Die Parametervariation am BASF-Motor brachten leider nicht den gewünschten Erfolg die Cetanzahlen aneinander anzugleichen, was allerdings auch daran liegt, dass ebenda die Ansauglufttemperatur nicht ohne einen großen Aufwand zu betreiben, verändert werden kann.

Mithilfe der Ergebnisse der AFIDA -Messungen konnten die festgestellten Ergebnisse überprüft und bestätigt werden. Beim AFIDA (advanced fuel ignition delay analyzer) handelt es sich um einen sogenannten Konstantvolumen-Tester, welcher neben dem CFR und BASF für die Bestimmung der Cetanzahl von Dieselmotoren als nichtmotorisches Prüfverfahren herangezogen werden kann. Es ist mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die verschiedenen Bewertungen der Cetanzahlen der FAME-Kraftstoffe an den beiden Motoren durch die unterschiedlichen Parameter im Brennraum zu erklären sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Statistik Austria: Website: www.statistik-austria.at, [Online] http://www.statistik-austria.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet_verkehr_strasse/index.html, 2019. Zugriff am 02.08.2019.
- [2] „Aral: Website: www.aral.de, [Online] <https://www.aral.de/de/forschung/kraftstoffe/dieselmotoren/eigenschaften/zuendwilligkeit.html>, 2019. Zugriff am 30.07.2019“.
- [3] Tschöke, H.; Mollenhauer, K.; Maier, R.: Handbuch Dieselmotoren: 4. Auflage. Wiesbaden: Springer-Vieweg, ISBN: 978-3-658-07696-2, 2018.
- [4] DIN EN 590:2017-10, Kraftstoffe - Dieselmotoren - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 590:2013+A1:2017.
- [5] Borgeest, K.: Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren: Messungen am Motor, Abgasanalytik, Prüfstände und Medienversorgung. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-10117-6, 2016.
- [6] Attenberger, A.; Remmele, E.: Entwicklung einer Prüfmehtode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoffen. Straubing: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), ISSN: 1614-1008, 2005.
- [7] Todsén, U.: Verbrennungsmotoren. München: Carl Hanser Verlag, ISBN: 978-3-446-45096-7, 2017.
- [8] Reif, K.: Basiswissen Dieselmotor. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-13984-1, 2018.
- [9] Merker, G. P.; Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise und alternative Antriebssysteme Verbrennung, Messtechnik und Simulation: 8. Auflage. Wiesbaden: Springer-Vieweg, ISBN: 978-3-658-19211-2, 2018.
- [10] Grohe, H; Russ, G.: Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Business Media, ISBN: 978-3-8343-3351-3, 2015.
- [11] Reif, K.: Dieselmotor- Management: Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-8348-1715-0, 2012.

- [12] Basshuysen, R. v.: Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven: 8. Auflage. Wiesbaden: Springer-Vieweg, ISBN: 978-3-658-10901-1, 2017.
- [13] Pischinger, R.; Kell, M.; Sams, T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Wien, New York: Springer, ISBN: 978-3211-99276-0, 2009.
- [14] Philippovich, A.: Chemisch- physikalische Grundlagen der Verwendung von Erdöl und seinen Produkten. Wien: Springer, ISBN: 978-3-7091-7897-3, 1960.
- [15] Pischinger, S.: Verbrennungskraftmaschinen I/II, 26. Auflage, Vorlesungsumdruck. RWTH- Aachen, 2007.
- [16] Plank, M.; Emberger, P.; Thuncke, K.; Remmele, E.: Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe. Straubing: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), ISSN: 1614-1008, 2017.
- [17] Pischinger, A.; Pischinger, F.: Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor. Wien: Springer, 1957.
- [18] Pischinger, F. et al: Abschlussbericht Sonderforschungsbereich 224, "Motorische Verbrennung", Aachen, 2001, <http://www.sfb224.rwth-aachen.de/bericht.htm>, p. 729.
- [19] Witzke, L.: Alternative Kraftstoffe für die dieselmotorische Verbrennung aus kohlenhydrathaltigen Biomassen und basierend auf bio- und chemisch-katalytischen Herstellverfahren. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, ISBN: 978-3-658-17676-1, 2017.
- [20] Krahl, J.; Munack, A.; Eilts, P.; Bünger, J.: Biokraftstoffsymposium, Forschung für zukünftige Mobilität: 8. Biokraftstoffsymposium am 27. und 28. Juli 2016, 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag, ISBN:978-3-7369-9811-7, 2018.
- [21] Watter, H.: Nachhaltige Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, ISBN: 978-3-8348-0742-7, 2009.
- [22] Hilgers, M.: Alternative Antriebe und Ergänzungen zum konventionellen Antrieb. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-14642-9, 2016.

- [23] Rechtsinformationssystem des Bundes: Website: www.ris.bka.gv.at, [Online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10004908>, 2019. Zugriff am 07.08.2019.
- [24] Schaper, K.; Munack, A.; Krahl, J.: Parametrierung der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Biokraftstoffen der 1,5. Generation. Göttingen: Cuvillier: ISBN: 978-3-95404-724-6, 2014.
- [25] Schröder, O.; Pabst, C.; Munack, A. und Krahl, J.: Absenkung der Siedelinie von Biodiesel mittels Metathese, MTZ Motortechnische Zeitschrift, Bd. 77, Nr. 2, S. 68–75, Feb. 2016.
- [26] DIN EN 14214:2019-05, Flüssige Mineralölerzeugnisse - Fettsäure-Methylsester (FAME) zur Verwendung in Dieselmotoren und als Heizöl - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 14214:2012+A2:2019.
- [27] Eifler, W.; Schlücker, E.; Spicher, W.; Will, G.: Küttner Kolbenmaschinen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, ISBN: 978-3-8351-0062-6, 2009.
- [28] Riediger, B.: Brennstoffe, Kraftstoffe, Schmierstoffe: Eine Einführung in ihre Chemie und Technologie für Ingenieure. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-92536-8, 1949.
- [29] DIN EN ISO 5165:2018-04, Mineralölerzeugnisse - Bestimmung der Zündwilligkeit von Dieselkraftstoffen - Cetan- Verfahren mit dem CFR- Motor (ISO 5165:2017); Deutsche Fassung EN 5165:2018.
- [30] ASTM D613 - 10a, 41/2000, Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [31] DIN EN 16906:2017-11, Flüssige Mineralölerzeugnisse - Bestimmung der Zündwilligkeit von Dieselkraftstoffen - Verfahren mit BASF-Prüfmotor; Deutsche Fassung EN 16906:2017.
- [32] Poel-Tec: Website: www.poel-tec.com, [Online] <https://www.poel-tec.com/lexikon/zuendwilligkeit.php>, 2019. Zugriff am 11.06.2019.
- [33] Huber, K.; Hauber, J.: Motorisches Prüfverfahren zur Bestimmung der Zündwilligkeit von Dieselkraftstoffen. MTZ Motortechnische Zeitschrift, 11/2013, Jahrgang 74, Seite 904-911.

- [34] Höppner, H.-H.: Bedienungsanleitung: Cetanzahlbestimmung mit dem BASF-Prüfdieselmotor, 2010.
- [35] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Website: www.gestis.itrust.de, [Online] [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/013170.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/013170.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0). Zugriff am 20.07.2019.
- [36] Waukesha- CFR: www.waukeshacfr.com, [Online] <http://www.waukeshacfr.com/f-5>. Zugriff am 05.04.2019.
- [37] Waukesha Engine, Waukesha CFR: F-5 Cetane Method Diesel Fuel Rating Unit Operation & Maintenance, First Edition. Wisconsin U. S. A., 1998.
- [38] ASTM: ASTM Manual for Rating Motor, Diesel, and Aviation Fuels. Easton (USA): American society for testing and Materials, Library of Congress Catalog Card Number: 79-15134, 1973.
- [39] Grote, K. H.; Bender, B.; Gröhlich, D.: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg: Springer, ISBN: 978-3-662-54804-2, 2018.
- [40] Auto und Umwelt: Website: www.auto-umwelt.at, [Online] http://www.auto-umwelt.at/_print/6_Kraftstoffe.pdf, 2010. Zugriff am 04.04.2019.
- [41] Sadlowski, T.; Richter, B.; Wichmann, V.; Schümann, U.; Harndorf, H.: Einfluß von Biokraftstoffblends auf moderne Dieselmotoren und deren Abgasnachbehandlungssysteme. 6. Rostocker Bioenergieforum, Rostock 2012.
- [42] Łukasik, Z.; Łenyk, M.: Fame oxidation and thermal stability. Problemy Eksploatacji, 02/2009, ISSN: 1232-9312, Seite 149-158.
- [43] Mattes, W.: Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter bei der Oktanzahl- Bestimmung am CFR- Prüfmotor sowie Vergleich zweier Methoden zur Cetanzahl- Bestimmung. Diplomarbeit am IVK der TU Wien, 1989.
- [44] Westbrook, C., K.; Naik, C., V.; Herbinet, O.; Pitz, W., J.; Mehl, M.; Sarathy, S., M.; Curran, H., J.: Detailed chemical kinetic reaction mechanisms for soy and rapeseed biodiesel fuels. Combustion and Flame, 04/2011, Bd. 158, Nr. 4, Seite 742–755.
- [45] Seidenspinner, Philipp (Analytik-Service Gesellschaft): Messergebnisse aus Versuchen mittels AFIDA-Messgerät (persönliche Mitteilung, 17.08.2019).

- [46] Prüfmotoren Technik-Teile GmbH Lohmar: Website: www.miboegmbh.de,
[Online] <https://miboegmbh.de/projekte>, 2017. Zugriff am 05.08.2019.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: PKW Fahrzeugbestand in Österreich von 2016 – 2018 [1].....	1
Abb. 2-1: Vorkammerverfahren [10].....	6
Abb. 2-2: Wirbelkammerverfahren [10].....	7
Abb. 2-3: Direkteinspritzer [10]	8
Abb. 2-4: Zylinderdruckverlauf CFR-Dieselmotor, differenzieller und integraler Heizverlauf mit Einspritzpunkt und Umsatzpunkten	12
Abb. 2-5: Zündverzug eines Alkan-Luft-Gemisches in einer schnellen Kompressionsmaschine (nachbearbeitet) [8]	13
Abb. 2-6: Zündverzug in Abhängigkeit der Temperatur und des Druckes (nachbearbeitet) [14].....	13
Abb. 2-7: Schematischer Verlauf der Zündverzugszeit mit ausgeprägtem NTC- Verhalten über den Kehrwert der Temperatur (nachbearbeitet) [15].....	14
Abb. 2-8: Typische Siedelinien für Diesel, RME und SME (nachbearbeitet) [24].....	19
Abb. 2-9: Strukturformel n-Hexadecan [27]	22
Abb. 2-10: Strukturformel α -Methylnaphtalin [27]	22
Abb. 2-11: CFR-Prüfmotor für die Bestimmung der Cetanzahl am IFA-Institut der TU-Wien.....	24
Abb. 2-12: Schnittbild CFR-Zylinderkopf inkl. Verstellereinheit (bearbeitet) [37].....	25
Abb. 2-13: BASF-Prüfmotor zur Bestimmung der Cetanzahl am IFA- Institut der TU-Wien	28
Abb. 2-14: Schnittbild BASF-Zylinderkopf mit Anbauteilen (bearbeitet) [34].....	28
Abb. 3-1: Schematischer Messaufbau am CFR-Motor	31
Abb. 3-2: Schematischer Messaufbau am BASF-Motor.....	33
Abb. 3-3: Niederdruckquarz	34
Abb. 3-4: Thermolement (Typ K) im Saugkanal	34
Abb. 3-5: Zylinderkopf am BASF-Motor	34
Abb. 3-6: Strukturformel 2-Ethylhexylnitrat [35]	36
Abb. 3-7: Gravimetrische Zusammensetzung der FAME-Kraftstoffe [A3, A4, A5, A6, A7]	37
Abb. 4-1: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die B7-Kraftstoffe	39
Abb. 4-2: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die B7-Kraftstoffe	40
Abb. 4-3: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die B30-Kraftstoffe	41
Abb. 4-4: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die B30-Kraftstoffe	41
Abb. 4-5: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die B100-Kraftstoffe	42
Abb. 4-6: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die B100-Kraftstoffe	43
Abb. 4-7: Gegenüberstellung der Cetanzahlen der B100-Kraftstoffe gemessen am CFR und BASF	43
Abb. 4-8: Cetanzahl der FAME-Kraftstoffe aus den Messungen mittels CFR und BASF ..	44
Abb. 4-9: Auswirkung auf die Cetanzahl aufgrund der Lagerung der FAME-Reinstoffe, gemessen nach ca. fünf Monaten am BASF	46
Abb. 4-10: Ermittelte Cetanzahlen am CFR für die Zündbeschleuniger	47
Abb. 4-11: Ermittelte Cetanzahlen am BASF für die Zündbeschleuniger	48
Abb. 4-12: Gegenüberstellung der Cetanzahlen der Zündbeschleuniger gemessen am CFR und BASF	48
Abb. 4-13: Ansaugluft- und Umgebungs-temperaturverlauf am CFR-Motor nach Warmlaufphase	49
Abb. 4-14: Ansaugluft- und Umgebungs-temperaturverlauf am BASF-Motor nach Warmlaufphase	49

Abb. 4-15: Temperatur und Ansaugluftentwicklung am BASF Motor.....	50
Abb. 4-16: Kalibrierkurven am BASF-Motor Beginn: $T_{Umg} = 20,4 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{Umg} = 993 \text{ mbar}$, r.L.= 39,4 %, Ende: $T_{Umg} = 21,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{Umg} = 992 \text{ mbar}$, r.L.= 44,6 %	52
Abb. 4-17: Ableseeinrichtungen der Parameter a) Voreinspritzung und Zündverzug am CFR, b) Ablesewert für die Verdichtung am CFR, c) Voreinspritzung und Zündverzug am BASF, d) Luftmenge am BASF.....	53
Abb. 4-18: Einspritzstrahl am CFR-Motor a) gereinigte Düse mit Diesel, b) gereinigte Düse mit FAME, c) verschmutzte Düse nach SME mit Diesel .	54
Abb. 4-19: Spraybild am CFR aufgenommen mit Dieselkraftstoff a) gereinigte Düse, b) verschmutzte Düse	55
Abb. 4-20: Düse und Düsennadel am CFR-Motor a) gereinigte Düsennadel, b) verschmutzte Düsennadel nach B100, c) verschmutzte Düse nach B100.....	55
Abb. 4-21: Einspritzstrahl und Spraybild am CFR-Motor mit verschmutzter Düse a) Einspritzstrahl nach B50, b) Einspritzstrahl nach fünf B100, c) Spraybild nach fünf B100.....	56
Abb. 4-22: Einspritzstrahl am BASF-Motor a) gereinigte Düse mit Diesel, b) gereinigte Düse mit FAME, c) verschmutzte Düse nach SME mit Diesel .	57
Abb. 4-23: Spraybild am CFR aufgenommen mit Dieselkraftstoff a) gereinigte Düse, b) verschmutzte Düse	57
Abb. 4-24: Düse und Düsennadel am BASF-Motor a) gereinigte Düsennadel, b) verschmutzte Düsennadel nach B100, c) verschmutzte Düsen nach B100	58
Abb. 4-25: Leitungsdruck und Nadelhubgeber vor der Anpassung am BASF	59
Abb. 4-26: Leitungsdruck und Nadelhubgeber nach der Anpassung am BASF	59
Abb. 4-27: Vergleich von Zylinderdruck und Heizverlauf zwischen CFR und BASF.....	60
Abb. 4-28: Schwingungen im Zylinderdrucksignal nach OT am BASF	62
Abb. 4-29: Gegenüberstellung Druckquarz- und Verbrennungsgebersignal am CFR und BASF.....	63
Abb. 4-30: Vergleich der berechneten Brennraumtemperatur am CFR und BASF bezogen auf die Messungen in Abb. 4-27	64
Abb. 4-31: Zyklusverlauf indizierter Mitteldruck am CFR und BASF.....	65
Abb. 4-32: Temperatur im Zylinder und Zylinderdruck zum Zeitpunkt des Einspritzvorganges am CFR und BASF	66
Abb. 4-33: Druckverlauf und Heizverlauf am CFR für IFA-Diesel und UCOME	68
Abb. 4-34: Temperaturverlauf am CFR für IFA-Diesel und UCOME bezogen auf die Messung aus Abb. 4-33	68
Abb. 4-35: Druckverlauf und Heizverlauf am BASF für IFA-Diesel und UCOME.....	69
Abb. 4-36: Temperaturverlauf am BASF für IFA-Diesel und UCOME bezogen auf die Messung aus Abb. 4-35	69
Abb. 4-37: Zyklusverlauf indizierter Mitteldruck am CFR und BASF ermittelt mit UCOME	71
Abb. 4-38: Verbrennungsaussetzer im FAME-Betrieb am BASF.....	72
Abb. 4-39: Leitungsdrucksignal zum Zeitpunkt der Einspritzung am CFR	73
Abb. 4-40: Nadelhubgebersignal zum Zeitpunkt der Einspritzung am BASF.....	73
Abb. 4-41: Änderungen am Heizverlauf am CFR im Betrieb mit B50.....	74
Abb. 4-42: Änderungen am Heizverlauf am BASF im Betrieb mit B50	74
Abb. 4-43: Zündverzug, Luftverhältnis und indizierter Mitteldruck bei unterschiedlichen Einspritzmengen am BASF-Motor.....	76
Abb. 4-44: Leckageanteil unterschiedlicher Kraftstoffe	76

Abb. 4-45: Ermittelte Luftmenge über die Einspritzmenge am BASF für IFA-FAME und zwei Referenzkraftstoffe	78
Abb. 4-46: Ermittelte Luftmenge über den Einspritzzeitpunkt am BASF für IFA-FAME und zwei Referenzkraftstoffe	79
Abb. 4-47: Zylinderdruck und Heizverlauf bei Variation des Einspritzzeitpunktes am BASF bezogen auf Abb. 4-46	80
Abb. 4-48: Ermittelte Luftmenge über den Einspritzdruck am BASF für IFA-FAME und zwei Referenzkraftstoffe	82
Abb. 4-49: Ermittelte Verdichtung über die Ansauglufttemperatur für die FAME, Referenzkraftstoffe sowie B0 am CFR.....	83
Abb. 4-50: Zündverzug über Kehrwert der Temperatur einzelner Säuren (nachbearbeitet) [44].....	85
Abb. 4-51: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 500 °C und einem Druck von 15 bar am AFIDA-Messgerät [45]	86
Abb. 4-52: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 650 °C und einem Druck von 15 bar am AFIDA-Messgerät [45]	87
Abb. 4-53: Drosselstelle am CFR-Motor, Öffnungsquerschnitt a) 60 %, b) 10 %, c) 0 %	87
Abb. 4-54: Zylinderdruck- und Brennraumtemperatur während der Parametervariation mittels B0.....	88
Abb. 4-55: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 650 °C und einem Druck von 10 bar am AFIDA-Messgerät [45]	89
Abb. 4-56: Ermittelte Druckverläufe unterschiedlicher Kraftstoffe bei einer Temperatur von 650 °C und einem Druck von 20 bar am AFIDA-Messgerät [45]	90

Anhang

6.2.18 *B*

OMV Qualitätszertifikat

erstellt am: 30.10.12



Produktnummer: **450017**

Produktname: **CEC Prüf-Dieselmkraftstoff schwefelfrei**

Empfänger: _____

TWG / Zugnr./Schiff: _____

Lieferung vom: 30.10.2012

aus Behälter: T-1008

Anzahl: 1

Transport: _____

Land: _____

Physikalisch - chemische Eigenschaften

Asche	<0,01	%M
Wasser	< 200	mg/kg
Koks (im 10% Rückstand)	< 0,3	mg/kg
Gesamtverschmutzung	< 24	mg/kg
Dichte bei 15°C	834,4	kg/m ³
Schwefel	7,9	mg/kg
CFPP	-16,0	°C
Cetanzahl	53,4	
Cetanzahlindex	50,8	CI
Flammpunkt	65,7	°C
Polyaromaten	3,0	%M
Siedeanalyse 10%	202,0	°C
Siedeanalyse 50%	261,0	°C
Siedeanalyse 90%	327,0	°C
Siedeanalyse 95%	349,0	°C
Siedeanalyse 250°C	41,0	%V
Siedeanalyse 350°C	96,0	%V
Viskosität bei 40°C	2,7	mm ² /s
Cloudpoint	-11,0	°C
Siedeende	358,0	°C

Achtung: Die zugehörigen Sicherheitsdatenblätter und Lieferspezifikationen sind unbedingt zu beachten !

Alle nicht ausdrücklich bekanntgegebenen Prüfwerte entsprechen den jeweiligen OMV - Lieferspezifikationen.

Dieses Zertifikat wurde elektronisch erstellt und ist ohne Unterschrift gültig

OMV Refining & Marketing GmbH
Raffinerie Schwechat
Qualitätskontrolle Schwechat

Mannwörther Straße 28
2320 Schwechat, Austria
Tel. Nr.: +43 1 40440 / 42216

Ersteller: W. Pokorny

Laborleiter: A. Ing. M. Jüttner

A1: Datenblatt CEC Prüfkraftstoff (IFA-Diesel)

Ergebnis der Prüfung

Probenbezeichnung	Probengefäß	Probenmenge	Probennummer	
Probe 3 Prof.Geringer-TU Wien - DK B0	Glasflasche	630ml	S-2019/0917/3	
Parameter	Verfahren	Ergebnis	Einheit	Akk.
visuelle Beurteilung	ASTM D 4176	-		<input checked="" type="checkbox"/>
sichtbare Fremdstoffe	ASTM D 4176	abwesend		<input checked="" type="checkbox"/>
Aussehen	ASTM D 4176	klar		<input checked="" type="checkbox"/>
Freies Wasser	ASTM D 4176	abwesend		<input checked="" type="checkbox"/>
Farbe	SOP-A-PSM-11	gelb		<input type="checkbox"/>
abgeleitete Celanzahl	EN 16715	54,12		<input checked="" type="checkbox"/>
Celanindex	EN ISO 4264	50,5		<input checked="" type="checkbox"/>
Dichte bei 15 °C	EN ISO 12185	835,9	kg/m³	<input checked="" type="checkbox"/>
Poly. arom. Kohlenwasserstoffe	EN 12916	-		<input checked="" type="checkbox"/>
1-Kernaromaten (MAH)	EN 12916	21,0	% (m/m)	<input checked="" type="checkbox"/>
Mehrkernaromaten (T+AH)	EN 12916	0,3	% (m/m)	<input checked="" type="checkbox"/>
Summe DAH+T+AH (POLY)	EN 12916	2,6	% (m/m)	<input checked="" type="checkbox"/>
2-Kernaromaten (DAH)	EN 12916	2,3	% (m/m)	<input checked="" type="checkbox"/>
Gesamtaromatengehalt	EN 12916	23,6	% (m/m)	<input checked="" type="checkbox"/>
Schwefelgehalt	EN ISO 20846	6,7	mg/kg	<input checked="" type="checkbox"/>
Mangan	EN 16576	<0,5	mg/l	<input checked="" type="checkbox"/>
Eisen	EN 16576	<0,5	mg/l	<input checked="" type="checkbox"/>
Flammpunkt P.M.	EN ISO 2719-Verfahren A	61,0	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
Koksdruckstand (v. 10% Destrukstand)	EN ISO 10370	<0,1	% (m/m)	<input checked="" type="checkbox"/>
Asche	EN ISO 6245	<0,005	% (m/m)	<input checked="" type="checkbox"/>
Wassergehalt	EN ISO 12937	40	mg/kg	<input checked="" type="checkbox"/>
Oxidationsstabilität	EN 15751	20,5	Stunden	<input checked="" type="checkbox"/>
Schmierfähigkeit, Verschleißnarben-Durchmesser bei 60°C	EN ISO 12156-1	393	µm	<input checked="" type="checkbox"/>
Viskosität bei 40 °C	EN ISO 3104	2,6205	mm²/s	<input checked="" type="checkbox"/>
Siedeverlauf, gaschromatographisches Verfahren	EN ISO 3924	-	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
% (V/V) aufgefangen bei 180°C	EN ISO 3924	3,2	% (V/V)	<input checked="" type="checkbox"/>
% (V/V) aufgefangen bei 250°C	EN ISO 3924	41,0	% (V/V)	<input checked="" type="checkbox"/>
% (V/V) aufgefangen bei 350°C	EN ISO 3924	92,9	% (V/V)	<input checked="" type="checkbox"/>
95 % (V/V) aufgefangen bei	EN ISO 3924	359,0	°C	<input checked="" type="checkbox"/>

A2: Prüfbericht: S-2019/0917/3 DK B0

Ergebnis der Prüfung

Parameter	Verfahren	Ergebnis	Einheit	Akk.
Siedebeginn	EN ISO 3924	168,7	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
5,0 %	EN ISO 3924	187,6	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
10,0 %	EN ISO 3924	199,5	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
15,0 %	EN ISO 3924	208,5	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
20,0 %	EN ISO 3924	217,6	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
25,0 %	EN ISO 3924	225,9	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
30,0 %	EN ISO 3924	234,1	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
35,0 %	EN ISO 3924	241,3	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
40,0 %	EN ISO 3924	248,6	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
45,0 %	EN ISO 3924	255,8	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
50,0 %	EN ISO 3924	263,0	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
55,0 %	EN ISO 3924	270,8	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
60,0 %	EN ISO 3924	286,4	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
75,0 %	EN ISO 3924	294,1	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
80,0 %	EN ISO 3924	303,2	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
85,0 %	EN ISO 3924	312,2	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
90,0 %	EN ISO 3924	337,6	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
95,0 %	EN ISO 3924	359,0	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
Siedende	EN ISO 3924	377,1	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
CFPP	EN 116	-44	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
Cloud Point	EN 23015	-19,8	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
FAME - Gehalt Verfahren A/B	EN 14078	<0,08	% (V/V)	<input checked="" type="checkbox"/>



ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

Technische Universität Wien
Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik
Getreidemarkt 9
1060 Wien
ÖSTERREICH

Ihr Zeichen : CSch
Ihr Auftrag : Terschek
Ihr Auftrag vom : 23.11.2018
Eingegangen am : 30.11.2018
Probenahme : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 03.12.2018
Ende der Prüfung(en) : 07.03.2019
Prüfbericht vom : 10.04.2019
Seite : 3 von 6

Prüfbericht: 2608716-3

Prüfmuster : RME Sortenrein 10 L
Gebinde : Glas - Flasche 250 ml
ASG-ID : 2608716_003

Siegel-Nr.: -

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Grenzwert DIN EN 14214 :2014		Einheit
			min.	max.	
Warena. Testkraftstoff bzw. -flüssigkeit	ASG 2227 (a)	03.12.18	-	-	
Rückstellung	ASG 2002 (a)	ok	-	-	-
C6:0 / Capronsäure	DIN EN 14103 :2015	<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C8:0 / Caprylsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C10:0 / Caprinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C12:0 / Laurinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C14:0 / Myristinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C16:0 / Palmitinsäure		4,4 4,4	-	-	% (m/m)
C16:1 / Palmitoleinsäure		0,3 0,3	-	-	% (m/m)
C17:0 / Heptadecansäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C18:0 / Stearinsäure		1,5 1,5	-	-	% (m/m)
C18:1 / Ölsäure		60,5 60,4	-	-	% (m/m)
C18:2 / Linolsäure		19,4 19,3	-	-	% (m/m)
C18:3 / Linolensäure		10,0 10,0	-	-	% (m/m)
C20:0 / Arachinsäure		0,6 0,6	-	-	% (m/m)
C20:1 / Gadoleinsäure		1,4 1,4	-	-	% (m/m)
C22:0 / Behensäure		0,3 0,3	-	-	% (m/m)
C22:1 / Erucasäure		0,5 0,5	-	-	% (m/m)
C24:0 / Lignocerinsäure		0,1 0,1	-	-	% (m/m)
C24:1 / Nervonsäure		0,2 0,2	-	-	% (m/m)
unbekannte Fettsäuren		0,7 0,9	-	-	% (m/m)
Peroxidzahl		DIN EN ISO 3960 :2010 (a)	19	-	-
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937 :2002	211	-	500	mg/kg
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112 :2016	6,1 6,1	8,0	-	h
Dichte [15 °C]	DIN EN ISO 12185 :1997	883,5	860	900	kg/m3
Kin. Viskosität [40 °C]	DIN EN ISO 3104 :1999	4,435	3,50	5,00	mm2/s

Dr. Hendrik Stein (stellv. Laborleiter)

(a) Dieses Prüfverfahren ist nicht Bestandteil der Akkreditierungsurkunde.
Dieser Prüfbericht ersetzt Prüfbericht 2608716-2.
Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts.
Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de. Akkreditiert nach DIN EN ISO / IEC 17025.



ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 486 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

A3: Prüfbericht: 2608716-3 RME Sortenrein, Analytik-Service Gesellschaft



ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

Technische Universität Wien
Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik
Getreidemarkt 9
1060 Wien
ÖSTERREICH

Ihr Zeichen : CSch
Ihr Auftrag : Terschek
Ihr Auftrag vom : 23.11.2018
Eingegangen am : 30.11.2018
Probenahme : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 03.12.2018
Ende der Prüfung(en) : 07.03.2019
Prüfbericht vom : 10.04.2019
Seite : 4 von 6

Prüfbericht: 2608716-3

Prüfmuster : SME Sortenrein 10 L
Gebinde : Glas - Flasche 250 ml
ASG-ID : 2608716_004

Siegel-Nr.: -

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Grenzwert DIN EN 14214 :2014		Einheit
			min.	max.	
Warena. Testkraftstoff bzw. -flüssigkeit	ASG 2227 (al)	03.12.18	-	-	
Rückstellung	ASG 2002 (al)	ok	-	-	-
C6:0 / Capronsäure	DIN EN 14103 :2015	<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C8:0 / Caprylsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C10:0 / Caprinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C12:0 / Laurinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C14:0 / Myristinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C16:0 / Palmitinsäure		10,2 10,2	-	-	% (m/m)
C16:1 / Palmitoleinsäure		0,1 0,1	-	-	% (m/m)
C17:0 / Heptadecansäure		<0,1 0,1	-	-	% (m/m)
C18:0 / Stearinsäure		4,2 4,3	-	-	% (m/m)
C18:1 / Ölsäure		25,1 25,0	-	-	% (m/m)
C18:2 / Linolsäure		51,7 51,6	-	-	% (m/m)
C18:3 / Linolensäure		7,0 6,7	-	-	% (m/m)
C20:0 / Arachinsäure		0,3 0,4	-	-	% (m/m)
C20:1 / Gadoleinsäure		0,2 0,2	-	-	% (m/m)
C22:0 / Behensäure		0,4	-	-	% (m/m)
C22:1 / Erucasäure		<0,1	-	-	% (m/m)
C24:0 / Lignocerinsäure		0,1	-	-	% (m/m)
C24:1 / Nervensäure	<0,1	-	-	% (m/m)	
unbekannte Fettsäuren		0,5	-	-	% (m/m)
Peroxidzahl	DIN EN ISO 3960 :2010 (al)	30	-	-	meq O2/kg
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937 :2002	298	-	500	mg/kg
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112 :2016	1,2 1,2	8,0	-	h
Dichte [15 °C]	DIN EN ISO 12185 :1997	885,7	860	900	kg/m3
Kin. Viskosität [40 °C]	DIN EN ISO 3104 :1999	4,152	3,50	5,00	mm2/s

Dr. Hendrik Stein (stellv. Laborleiter)

[a] Dieses Prüfverfahren ist nicht Bestandteil der Akkreditierungsurkunde.

Dieser Prüfbericht ersetzt Prüfbericht 2608716-2.

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de. Akkreditiert nach DIN EN ISO / IEC 17025.



ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 486 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

A4: Prüfbericht: 2608716-3 SME Sortenrein, Analytik-Service Gesellschaft



ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

Technische Universität Wien
Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik
Getreidemarkt 9
1060 Wien
ÖSTERREICH

Ihr Zeichen : CSch
Ihr Auftrag : Terschek
Ihr Auftrag vom : 23.11.2018
Eingegangen am : 30.11.2018
Probenahme : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 03.12.2018
Ende der Prüfung(en) : 07.03.2019
Prüfbericht vom : 10.04.2019
Seite : 1 von 6

Prüfbericht: 2608716-3

Prüfmuster : FAME Sommer Blend 10 L
Gebinde : Glas - Flasche 250 ml
ASG-ID : 2608716_001

Siegel-Nr.: -

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Grenzwert DIN EN 14214 :2014		Einheit	
			min.	max.		
Warena. Testkraftstoff bzw. -flüssigkeit	ASG 2227 (al)	03.12.18	-	-		
Rückstellung	ASG 2002 (al)	ok	-	-	-	
C6:0 / Capronsäure	DIN EN 14103 :2015	<0,1	-	-	% (m/m)	
C8:0 / Caprylsäure		<0,1	-	-	% (m/m)	
C10:0 / Caprinsäure		<0,1	-	-	% (m/m)	
C12:0 / Laurinsäure		<0,1	-	-	% (m/m)	
C14:0 / Myristinsäure		0,2	-	-	% (m/m)	
C16:0 / Palmitinsäure		12,1	-	-	% (m/m)	
C16:1 / Palmitoleinsäure		0,3	-	-	% (m/m)	
C17:0 / Heptadecansäure		<0,1	-	-	% (m/m)	
C18:0 / Stearinsäure		2,4	-	-	% (m/m)	
C18:1 / Ölsäure		53,3	-	-	% (m/m)	
C18:2 / Linolsäure		20,6	-	-	% (m/m)	
C18:3 / Linolensäure		7,9	-	-	% (m/m)	
C20:0 / Arachinsäure		0,5	-	-	% (m/m)	
C20:1 / Gadoleinsäure		1,1	-	-	% (m/m)	
C22:0 / Behensäure		0,3	-	-	% (m/m)	
C22:1 / Erucasäure		0,4	-	-	% (m/m)	
C24:0 / Lignocerinsäure		0,1	-	-	% (m/m)	
C24:1 / Nervensäure		0,1	-	-	% (m/m)	
unbekannte Fettsäuren			0,7	-	-	% (m/m)
Peroxidzahl		DIN EN ISO 3960 :2010 (al)	24	-	-	meq O2/kg
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937 :2002	247	-	500	mg/kg	
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112 :2016	5,6 5,5	8,0	-	h	
Dichte [15 °C]	DIN EN ISO 12185 :1997	882,1	860	900	kg/m3	
Kin. Viskosität [40 °C]	DIN EN ISO 3104 :1999	4,415	3,50	5,00	mm2/s	

Dr. Hendrik Stein (stellv. Laborleiter)

(a) Dieses Prüfverfahren ist nicht Bestandteil der Akkreditierungsurkunde.
Dieser Prüfbericht ersetzt Prüfbericht 2608716-2.
Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts.
Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de. Akkreditiert nach DIN EN ISO / IEC 17025.



ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 486 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

A5: Prüfbericht: 2608716-3 FAME - Sommerblend, Analytik-Service Gesellschaft



ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

Technische Universität Wien
Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik
Getreidemarkt 9
1060 Wien
ÖSTERREICH

Ihr Zeichen : CSch
Ihr Auftrag : Terschek
Ihr Auftrag vom : 23.11.2018
Eingegangen am : 30.11.2018
Probenahme : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 03.12.2018
Ende der Prüfung(en) : 07.03.2019
Prüfbericht vom : 10.04.2019
Seite : 2 von 6

Prüfbericht: 2608716-3

Prüfmuster : FAME Winter Blend 10 L
Gebinde : Glas - Flasche 250 ml
ASG-ID : 2608716_002

Siegel-Nr.: -

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Grenzwert DIN EN 14214 :2014		Einheit
			min.	max.	
Warena. Testkraftstoff bzw. -flüssigkeit	ASG 2227	03.12.18	-	-	
Rückstellung	ASG 2002	ok	-	-	-
C6:0 / Capronsäure	DIN EN 14103 :2015	<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C8:0 / Caprylsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C10:0 / Caprinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C12:0 / Laurinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C14:0 / Myristinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C16:0 / Palmitinsäure		6,3 6,3	-	-	% (m/m)
C16:1 / Palmitoleinsäure		0,3 0,3	-	-	% (m/m)
C17:0 / Heptadecansäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C18:0 / Stearinsäure		1,7 1,7	-	-	% (m/m)
C18:1 / Ölsäure		59,6 59,5	-	-	% (m/m)
C18:2 / Linolsäure		18,9 18,9	-	-	% (m/m)
C18:3 / Linolensäure		9,6 9,5	-	-	% (m/m)
C20:0 / Arachinsäure		0,5 0,6	-	-	% (m/m)
C20:1 / Gadoleinsäure		1,3 1,3	-	-	% (m/m)
C22:0 / Behensäure		0,3 0,3	-	-	% (m/m)
C22:1 / Erucasäure		0,5 0,5	-	-	% (m/m)
C24:0 / Lignocerinsäure		0,1 0,1	-	-	% (m/m)
C24:1 / Nervonsäure		0,2 0,2	-	-	% (m/m)
unbekannte Fettsäuren		0,6 0,8	-	-	% (m/m)
Peroxidzahl		DIN EN ISO 3960 :2010	19	-	-
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937 :2002	225	-	500	mg/kg
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112 :2016	6,1 5,9	8,0	-	h
Dichte [15 °C]	DIN EN ISO 12185 :1997	883,1	860	900	kg/m3
Kin. Viskosität [40 °C]	DIN EN ISO 3104 :1999	4,440	3,50	5,00	mm2/s

Dr. Hendrik Stein (stellv. Laborleiter)

[a] Dieses Prüfverfahren ist nicht Bestandteil der Akkreditierungsurkunde.
Dieser Prüfbericht ersetzt Prüfbericht 2608716-2.
Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts.
Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de. Akkreditiert nach DIN EN ISO / IEC 17025.



ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 486 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

A6: Prüfbericht: 2608716-3 FAME - Winterblend, Analytik-Service Gesellschaft



ASG
Analytik-Service
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30 • 86356 Neusäss • Germany

Technische Universität Wien
Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik
Getreidemarkt 9
1060 Wien
ÖSTERREICH

Ihr Zeichen : CSch
Ihr Auftrag : Terschek
Ihr Auftrag vom : 23.11.2018
Eingegangen am : 30.11.2018
Probenahme : Kunde
Beginn der Prüfung(en) : 03.12.2018
Ende der Prüfung(en) : 07.03.2019
Prüfbericht vom : 10.04.2019
Seite : 5 von 6

Prüfbericht: 2608716-3

Prüfmuster : UCOME used cooking oil methyl ester 10 L
Gebinde : Glas - Flasche 250 ml
ASG-ID : 2608716_005

Siegel-Nr.: -

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Grenzwert DIN EN 14214 :2014		Einheit
			min.	max.	
Warena. Testkraftstoff bzw. -flüssigkeit	ASG 2227 (al)	03.12.18	-	-	
Rückstellung	ASG 2002 (al)	ok	-	-	-
C6:0 / Capronsäure	DIN EN 14103 :2015	<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C8:0 / Caprylsäure		0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C10:0 / Caprinsäure		<0,1 <0,1	-	-	% (m/m)
C12:0 / Laurinsäure		0,4 0,4	-	-	% (m/m)
C14:0 / Myristinsäure		0,8 0,8	-	-	% (m/m)
C16:0 / Palmitinsäure		17,9 17,8	-	-	% (m/m)
C16:1 / Palmitoleinsäure		1,5 1,5	-	-	% (m/m)
C17:0 / Heptadecansäure		0,2 0,2	-	-	% (m/m)
C18:0 / Stearinsäure		5,5 5,5	-	-	% (m/m)
C18:1 / Ölsäure		42,9 42,8	-	-	% (m/m)
C18:2 / Linolsäure		24,2 24,1	-	-	% (m/m)
C18:3 / Linolensäure		3,5 3,6	-	-	% (m/m)
C20:0 / Arachinsäure		0,3 0,4	-	-	% (m/m)
C20:1 / Gadoleinsäure		0,6 0,6	-	-	% (m/m)
C22:0 / Behensäure		0,3 0,3	-	-	% (m/m)
C22:1 / Erucasäure		0,3 0,3	-	-	% (m/m)
C24:0 / Lignocerinsäure		0,1 0,1	-	-	% (m/m)
C24:1 / Nervonsäure		0,2 0,1	-	-	% (m/m)
unbekannte Fettsäuren		1,2 1,4	-	-	% (m/m)
Peroxidzahl		DIN EN ISO 3960 :2010 (al)	3	-	-
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937 :2002	293	-	500	mg/kg
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112 :2016	4,8 4,8	8,0	-	h
Dichte [15 °C]	DIN EN ISO 12185 :1997	882,9	860	900	kg/m3
Kin. Viskosität [40 °C]	DIN EN ISO 3104 :1999	4,659	3,50	5,00	mm2/s

Dr. Hendrik Stein (stellv. Laborleiter)

(a) Dieses Prüfverfahren ist nicht Bestandteil der Akkreditierungsurkunde.
Dieser Prüfbericht ersetzt Prüfbericht 2608716-2.
Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts.
Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter www.asg-analytik.de. Akkreditiert nach DIN EN ISO / IEC 17025.



ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30
86356 Neusäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0
fax +49 (0) 821 486 2519
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager:
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

A7: Prüfbericht: 2608716-3 UCOME Sortenrein, Analytik-Service Gesellschaft