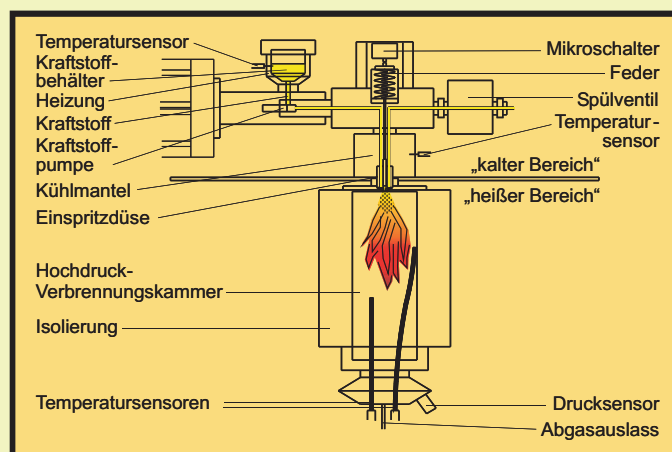




Berichte aus dem TFZ

Entwicklung einer Prüf- methode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff



Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff



Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff

Andreas Attenberger
Dr. Edgar Remmele

Berichte aus dem TFZ 6

Straubing, November 2003

Titel: Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff

Projektleiter: Dr. Edgar Remmele

Autoren: Andreas Attenberger
Dr. Edgar Remmele

Bearbeiter: Andreas Attenberger

in Kooperation mit: Dr. Thomas Wilharm, Analytik-Service Gesellschaft mbH, Täferlingen

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten unter der Ordnungs-Nummer: N/02/07 (Aktenzeichen: Z 3/a-0734-1588) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2005
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
Schulgasse 18, 94315 Straubing

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: A. Attenberger
Verlag: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2005
Gestaltung: A. Attenberger, H. Sporrer

Fotonachweis: Attenberger (27, 71, 72)
Titelbild: Fueltech AS, Trondheim (Norway)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einleitung.....	13
2 Problemstellung.....	15
3 Stand des Wissens	17
3.1 Grundlagen der dieselmotorischen Verbrennung	17
3.2 Dieselmotorischer Zündverzug	17
3.3 Einflussfaktoren auf den dieselmotorischen Zündverzug.....	18
3.3.1 Temperatur im Brennraum	18
3.3.2 Druck im Brennraum	20
3.3.3 Einspritzdruck.....	20
3.3.4 Eingespritzte Kraftstoffmenge.....	20
3.3.5 Düsenlochdurchmesser	20
3.3.6 Zündwilligkeit	21
3.3.7 Siedeverlauf und Viskosität.....	21
3.3.8 Einordnung der Einflussfaktoren auf den Zündverzug.....	21
3.4 Zündwilligkeit von Dieselkraftstoff	21
3.5 Zündwilligkeit von Rapsölkraftstoff.....	23
3.6 Alternative Prüfmethode zur Bestimmung der Zündwilligkeit	25
4 Zielstellung.....	27
5 Methodisches Vorgehen.....	29
5.1 Aufbau der Messeinrichtung	29
5.2 Durchgeführte Vorversuche	32
5.3 Methodenentwicklung	32
5.4 Messtechnisch relevante Parameter.....	33
5.5 Auswahl der Voreinstellungen für die Messung von Dieselkraftstoff	34
5.5.1 Anzahl der Einzelmessungen (Einspritzungen).....	34
5.5.2 Regelungsparameter	35
5.5.3 Brennkammerdruck	35
5.5.4 Brennkammertemperatur	35
5.5.5 Einspritzdruck.....	35
5.5.6 Einspritzdüsenlochdurchmesser	36
5.5.7 Kraftstofftemperatur	36
5.5.8 Kraftstoffmenge.....	36
5.5.9 Weitere Messparameter	36

5.6	Statistische Auswertung der Einzelmessungen des Zündverzugs	38
5.6.1	Die Idee des M-Schätzers.....	39
5.6.2	M-Schätzer für Lokations- und Skalenparameter.....	40
5.6.3	Die Implementation der Lokations-M-Schätzung und des Vertrauensintervalls im LOK Programm.....	41
5.7	Einlesen der Referenzkurven	43
5.8	Verwendete Kraftstoffe	44
5.9	Cetanzahlmessung mit dem FIT	44
6	Ergebnisse und Diskussion	45
6.1	Cetanzahlmessung von Dieseldieselkraftstoff mit dem FIT	45
6.1.1	Überprüfung des LOK Statistik Programms zur Ausreißereliminierung	45
6.1.2	Anzahl der Einzelmessungen.....	46
6.1.3	Anpassung der allgemeinen Regelparameter	48
6.1.4	Anpassung der Kammerdruckregulation.....	50
6.1.5	Anpassung der Brennkammertemperatur und des Brennkammerdrucks	52
6.2	Cetanzahlbestimmung mit dem modifizierten FIT	55
6.2.1	Vergleich der Standardeinstellung des FIT mit den optimierten Messgeräteeinstellungen	55
6.2.2	Cetanzahlmessung mit größerem Einspritzdüsendurchmesser.....	56
6.3	Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff	58
6.4	Beschreibung der Prüfmethode für die Zündwilligkeitsbestimmung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester	63
6.5	Messung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoffproben	65
6.6	Überprüfung möglicher Einflüsse auf die ermittelten Cetanzahlen	66
6.7	Störungen am Messgerät	69
6.8	Abschließende Beurteilung der CN-Messung mit dem FIT	71
	Zusammenfassung.....	73
	Summary	77
	Quellenverzeichnis	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Der dieselmotorische Zündverzug in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur	19
Abbildung 2:	Cetan (C16H34) – Cetanzahl 100.....	22
Abbildung 3:	α -Methyl-Naphthalin (C11H10)– Cetanzahl 0.....	22
Abbildung 4:	Brennkammer und Einspritzeinheit des FIT	29
Abbildung 5:	Schematischer Aufbau des Fuel Ignition Tester.....	30
Abbildung 6:	ψ - Funktion.....	42
Abbildung 7:	χ - Funktion.....	42
Abbildung 8:	Funktion für \tilde{a}_H	43
Abbildung 9:	ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 5 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieselmotor (CN = 50 im Prüfmotor).....	45
Abbildung 10:	ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 5 Messungen mit Dieselmotor (CN = 53,6 im Prüfmotor) bei 10, 15 und 20 Einspritzungen	47
Abbildung 11:	ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 3 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieselmotor (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 1, 2 und 4.....	49
Abbildung 12:	ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 3 Messungen mit Dieselmotor (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 5 und 6 à 20 Einzelmessungen	51
Abbildung 13:	ORG- und LOK-Zündverzögerungen von 3 Messungen mit Dieselmotor (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 9, 10, 11 und 12 à 20 Einzelmessungen.....	53
Abbildung 14:	ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieselmotor (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 13 und 14	55
Abbildung 15:	ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieselmotor (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 15, 16, 17 und 18	57
Abbildung 16:	ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen zweier Rapsölmotorproben (Variante 14)	58
Abbildung 17:	Zündverzögerungen der Einzelmessungen einer Cetanzahlmessung mit Rapsölmotor B und Dieselmotor (CN = 53,6) für Variante 13.....	60
Abbildung 18:	Zündverzögerungen der Einzelmessungen einer Cetanzahlmessung mit Rapsölmotor B und Dieselmotor (CN = 53,6) für Variante 14.....	61
Abbildung 19:	ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Rapsölmotor A der Varianten 17 und 18.....	62
Abbildung 20:	Cetanzahlmessungen mit je 20 Einzelmessungen von Rapsölmotorproben	65

Abbildung 21: Korrelation zwischen den ermittelten Cetanzahlen und der Peroxidzahl der untersuchten Rapsölkraftstoffe	66
Abbildung 22: Korrelation zwischen den ermittelten Cetanzahlen und der Neutralisationszahl der untersuchten Rapsölkraftstoffe	67
Abbildung 23: Korrelation zwischen den ermittelten Cetanzahlen und der Oxidationsstabilität der untersuchten Rapsölkraftstoffe.....	68
Abbildung 24: Schwankungen der Zündverzögerungen von 4 aufeinanderfolgenden Cetanzahlmessungen mit je 20 Einspritzungen von Dieselmotorkraftstoff bekannter Cetanzahl bei unveränderten Messbedingungen.....	69
Abbildung 25: Ablagerungen an der Einspritzdüse des FIT-1 nach mehreren Cetanzahlmessungen von Rapsölkraftstoff.....	70
Abbildung 26: Einspritzeinheit FIT-1 nach Austausch der Einspritzdüse.....	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beschreibung der wichtigsten Messparameter für die Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester	37
Tabelle 2:	Parameter der Varianten 1 bis 18 für die Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester.....	38
Tabelle 3:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von fünf Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen	46
Tabelle 4:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für 10, 15 und 20 Einzelmessungen von 5 Cetanzahlmessungen.....	48
Tabelle 5:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Varianten 1, 2 und 4 von 3 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen	50
Tabelle 6:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Varianten 5 und 6 von 3 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen	51
Tabelle 7:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Zündverzögerungen für die Varianten 9, 10, 11 und 12 von 3 Messungen à 20 Einzelmessungen	54
Tabelle 8:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Zündverzögerungen für die Varianten 1 bis 12	54
Tabelle 9:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Varianten 13 und 14 von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen	56
Tabelle 10:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Varianten 15, 16, 17 und 18 von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen	57
Tabelle 11:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Rapsölkraftstoffe A und B von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen	59
Tabelle 12:	Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Varianten 17 und 18 von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen	62
Tabelle 13:	Optimierte Messparameter für die Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester	64
Tabelle 14:	Optimierte Messparameter für die Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester	74
Table 15:	Optimised settings for the Cetane number determination of rapeseed oil fuel with the Fuel Ignition Tester	78

Abkürzungsverzeichnis

\bar{x}	Mittelwert
$\hat{\mu}$	Huber Schätzer
ψ	Psi
μ	Lokationsparameter
°C	Grad Celsius
bar	1 bar = 10 ⁵ Pa
CN	Cetanzahl (Cetane number) ermittelt im Prüfmotor
FIA	Fuel Ignition Analyser
FIT	Fuel Ignition Tester
FIT-1	Fuel Ignition Tester nach Wartung durch den Hersteller
FIT-CN	Cetanzahl (Cetane number) ermittelt im Fuel Ignition Tester
LOK-CN	statistisch korrigierte FIT-Cetanzahl
MAN-CN	manuell korrigierte FIT-Cetanzahl laut Herstellerempfehlung
ORG-CN	original FIT-Cetanzahl ohne Korrektur
R	Spannweite
RK	Rapsölkraftstoff
s	Standardabweichung

1 Einleitung

Durch die Verteuerung von Erdölprodukten aufgrund knapper werdender Ressourcen und eine zunehmende Abhängigkeit von den erdölexportierenden Staaten richtet sich das Augenmerk von Privatleuten, Landwirten und Unternehmen vermehrt auf zukunftssträchtige, alternative Energieträger.

Hinzu kommen, speziell in der Landwirtschaft, der allgemeine Kostendruck, die Diskussionen über eine neue Agrardieselregelung, aber auch umweltpolitische Aspekte, die bereits Einzug in das deutsche Steuersystem (Ökosteuer) gefunden haben und dadurch den Dieselmotoren zusätzlich verteuern.

Eine Alternative zum herkömmlichen Dieselmotoren bietet Rapsöl, das in umgerüsteten Dieselmotoren als Dieselmotorenersatz eingesetzt werden kann. Raps ist bei den in Deutschland vorherrschenden klimatischen Verhältnissen die ertragreichste Ölpflanze. Aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften ist Rapsöl das bevorzugte Pflanzenöl für die Nutzung als Kraftstoff. Weitere Gründe für eine steigende Nachfrage nach Rapsöl als Kraftstoffsubstitut sind die verminderte Kohlendioxidbelastung der Umwelt sowie die Einstufung von Rapsöl als nicht wassergefährdend. Ersteres steht im Einklang mit den Zielen zur Förderung regenerativer Biokraftstoffe und letztlich der Absicht, den CO₂-Ausstoß gemäß dem Kyoto-Protokoll zu reduzieren.

In einem vom Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten geförderten Untersuchungsvorhaben wurde vom Technologie- und Förderzentrum der „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard) 05/2000“ erarbeitet, in dem Mindestanforderungen an die Qualität für die Nutzung von Rapsöl als Kraftstoff in pflanzenöлтаuglichen Dieselmotoren festgelegt sind [22] [23]. Der RK-Qualitätsstandard 05/2000 hat inzwischen, nicht nur bundesweit, große Verbreitung gefunden und ist sowohl von Wissenschaft und Praxis, als auch von Seiten der Industrie anerkannt.

2 Problemstellung

Die Zündwilligkeit, ein beschreibendes Qualitätskriterium von Kraftstoffen für die dieselmotorische Verbrennung, ausgedrückt durch die Cetanzahl konnte mangels eines geeigneten Prüfverfahrens für Rapsölkraftstoff noch nicht im RK-Qualitätsstandard 05/2000 festgelegt werden [22] [23].

Für Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 590 [9] erfolgt die Bestimmung der Zündwilligkeit entweder im BASF-Prüfmotor nach DIN 51773 [8], oder im CFR-Prüfmotor nach DIN EN ISO 5165 [10].

Aufgrund der höheren Viskosität von Rapsölkraftstoff erfolgt bei dessen Einsatz in einem auf Dieselkraftstoff optimierten Prüfmotor eine mangelhafte Einspritzung des Kraftstoffs, wodurch es zu einer unvollständigen Verbrennung kommt. Dies führt bereits nach kurzer Prüfdauer zu einem Verkoken der Einspritzdüsen [23] [26]. Somit ist die Cetanzahlmessung von Rapsöl mit einem nicht auf Pflanzenöl optimierten Prüfmotor ungeeignet, zudem liefert sie kaum vergleichbare Ergebnisse. Eine Anpassung der Prüfmotoren für den Pflanzenölbetrieb ist aufwändig und kostenintensiv [23] [26]. Für die Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff muss deshalb ein geeignetes Prüfverfahren gefunden werden.

Bisherige Untersuchungen von Rapsölkraftstoff ergaben eine wesentlich schlechtere Zündwilligkeit im Vergleich zum handelsüblichen Dieselkraftstoff. Dies erklärt jedoch nicht die in umgerüsteten Dieselmotoren beobachteten guten Zünd- und Verbrennungseigenschaften von Rapsöl [16].

Einen möglichen Ansatzpunkt für eine objektive Bestimmung der Zündwilligkeit von Rapsölkraftstoff bieten zwei neuartige Messgeräte. Der überwiegend in Kanada und den vereinigten Staaten verbreitete „Ignition Quality Tester (IQT)“ der Firma AET (Advanced Engine Technology), Ottawa/Ontario sowie der „Fuel Ignition Tester (FIT)“ der Firma Fueltech AS, Trondheim/Norwegen. Bei beiden Messgeräten wird die Zündwilligkeit über den gemessenen Zündverzögerung des Kraftstoffes in einer beheizten Hochdruckkammer mit konstantem Volumen bestimmt.

Bei dem genannten Fuel Ignition Tester (FIT) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des „Fuel Ignition Analyser (FIA-100)“ derselben Firma, der bereits mit Erfolg zur Cetanzahlbestimmung von hochviskosem Marineschweröl (HFO) eingesetzt wird [12] [24].

Erste Vorversuche mit einem Fuel Ignition Tester zeigten aufgrund der frei definierbaren Messbedingungen bezüglich der Temperatur und des Drucks in der Brennkammer eine grundsätzliche Eignung des Messgeräts für die Cetanzahlmessung von Diesel-, als auch insbesondere von Rapsölkraftstoff [22].

Es existieren jedoch für den Betrieb der beiden Geräte noch keine standardisierten Prüfverfahren. Für eine aussagekräftige Cetanzahlbestimmung von Rapsölkraftstoff ist es jedoch notwendig, eine verbindliche Prüfmethode zu entwickeln, die die Vorgaben in Bezug auf die Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit für die Messung von Dieselkraftstoff erfüllt.

3 Stand des Wissens

3.1 Grundlagen der dieselmotorischen Verbrennung

Die dieselmotorische Verbrennung ist in die Teilbereiche Kraftstoffeinspritzung, Zerfall des Einspritzstrahls, Kraftstoffverdampfung, Diffusion sowie Zündung und Verbrennung untergliedert. Ein Dieselmotor ist ein hochverdichtender Verbrennungsmotor mit Selbstzündung, bei dem der Aufbereitung des Kraftstoffes und der Luft in ein zündfähiges Gemisch besondere Bedeutung zukommt. Es erfolgt hierbei eine innere Gemischbildung, im Gegensatz zu einer äußeren Gemischbildung wie zum Beispiel in einem Vergaser.

Die Luft wird angesaugt und verdichtet, wobei sie so stark erwärmt wird, dass fein verteilter Kraftstoff sich in ihr selbst entzünden kann. Die Zerstäubung des Kraftstoffs erfolgt durch das Einspritzsystem, hierbei wird der Kraftstoff als kompakter Strahl kurz bevor der Kolben den oberen Totpunkt erreicht, in den Brennraum eingespritzt. Die Tröpfchenbildung erfolgt durch Pulsationsvorgänge im Strahl sowie durch die Luftreibung; im Brennraum verformen und teilen sich die entstandenen Tröpfchen mehrmals. Es erfolgt ein Wärmeübergang von der erhitzten Luft zu den Kraftstofftröpfchen, wodurch diese verdampfen. Im Brennraum liegt nun ein inhomogenes Kraftstoff/Luft-Gemisch vor. Charakteristisch für einen Dieselmotor ist der auftretende Zündverzug, da sich der Kraftstoff im Brennraum nicht sofort entzündet. [20]

3.2 Dieselmotorischer Zündverzug

Der Prozess der Selbstzündung im Dieselmotor ist das Ergebnis einer Reihe eng miteinander verknüpfter, komplexer physikalischer und chemischer Teilprozesse, deren Ablauf unter dem Begriff des Zündverzugs zusammengefasst wird [21].

Der Zündverzug ist definiert als der Zeitpunkt zwischen Einspritzbeginn (Düsennadelhub) und Zündbeginn des Kraftstoffs (Brennraumdruckinduzierung) [20]. Er beginnt mit der ersten Einspritzung des flüssigen Kraftstoffs direkt in den Brennraum, beziehungsweise je nach Motorbauart in die Vor- oder Wirbelkammer. Die sich daran anschließenden Vorgänge der Strahlausbreitung, Zerstäubung und Verdampfung werden als „Physikalischer Zündverzug“ bezeichnet. Mit dem Beginn der Verdampfung des eingespritzten Kraftstoffs beginnen bereits erste chemische Vorreaktionen des Kraftstoffdampfes mit dem Luftsauerstoff, die nach dem sogenannten chemischen Zündverzug schließlich zur ersten Selbstzündung in der Gasphase führen. Da die Gemischaufbereitung im Brennraum auch nach diesem chemischen Zündverzug noch nicht vollständig abgeschlossen ist, sind der physikalische und der chemische Zündverzug nicht voneinander zu trennen. Zusätzlich ändern sich während des gesamten Vorgangs die thermodynamischen Randbedingungen des Prozesses, wie Druck und Temperatur, zum einen durch die Kolbenbewegung und zum anderen durch die lokale Abkühlung im Bereich des Einspritzstrahls aufgrund der Verdampfung des Kraftstoffs. Die chemische Zündverzugszeit ist im wesentlichen von Temperatur, Druck und Luftverhältnis abhängig, so wird die Selbstzündung im Einspritzstrahl von der zeitlichen Entwicklung dieser Größen bestimmt. In Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten im Zylinder kommt es im Brennraum meist an mehreren, stochastisch verteilten Stellen kurz hintereinander zur Selbstzündung. Auf die ersten lokalen Selbstzündungen folgt die Verbrennung des heteroge-

nen Kraftstoff-Luft-Gemisches, wobei das Ende des Zündverzuges und damit der Beginn der Verbrennung im Motor meist durch den ersten messbaren Druckanstieg ermittelt wird. BORN (2001) [6] weist darauf hin, dass der Zündverzug teilweise auch über weitere Kriterien, wie z.B. vordefinierte Anstiege in der Temperatur, der OH-Konzentration oder auch das Erscheinen von Licht im sichtbaren Bereich, das sogenannte Rußleuchten, erfasst wird. In Versuchsanordnungen mit einem optischen Zugang kann die erste Selbstzündung sehr genau durch die dabei emittierte Strahlung registriert werden. Sowohl der Einspritzvorgang, als auch die Selbstzündungsvorgänge sind aber mit Einsatz der Verbrennungsphase in der Regel noch nicht abgeschlossen. [6] [21]

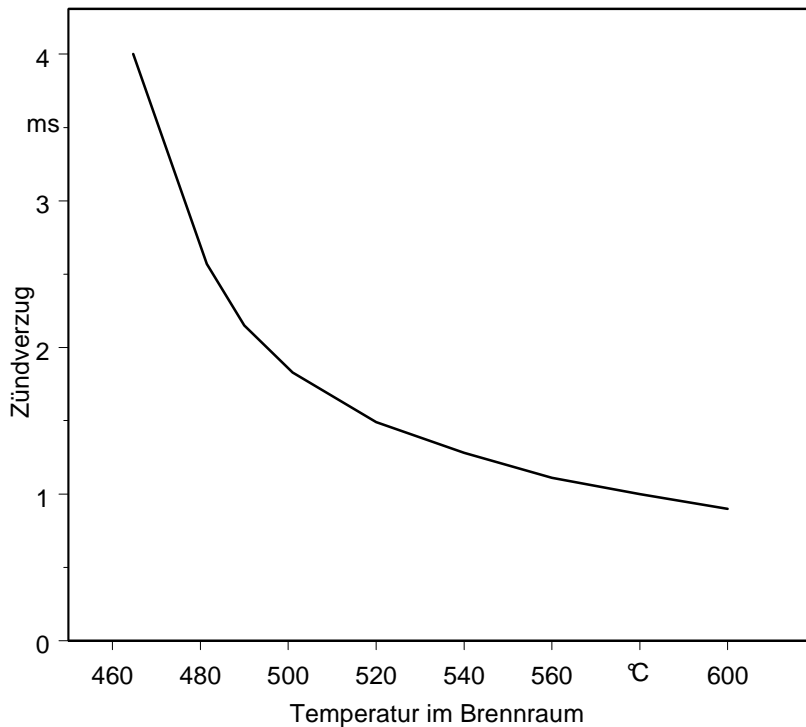
Bezüglich des dieselmotorischen Betriebsverhaltens führt ein kurzer Zündverzug infolge der geringen, in dieser Zeit eingespritzten Kraftstoffmenge zu niedrigen Werten für Druckanstieg, Spitzendruck und Spitzentemperatur des Gases im Brennraum. Bei einer verspäteten Zündung kommt es zu einer schlagartigen Verbrennung und damit zu einer erhöhten Geräusentwicklung. Eine hohe Cetanzahl ermöglicht dem Motor eine größere Laufruhe und bewirkt so eine geringere Abnutzung [1]. Bei einem kurzen Zündverzug verringern sich die Stickoxidemissionen, welche hauptsächlich bei hohen Gastemperaturen gebildet werden (thermisches NO_x). Dem steht ein vergleichsweise hoher Kraftstoffverbrauch und Schwarzausstoß gegenüber. Der hohe Verbrauch lässt sich durch die bei niedrigerer Temperatur und Druck eher schleppend ablaufende Verbrennung erklären. Schwarzauchbildung ist darauf zurückzuführen, dass eine relativ große Kraftstoffmenge nach Zündbeginn in sehr heiße, teilweise brennende Gase eingespritzt wird und dabei partiell gekrackt wird, wodurch sich im weiteren Verlauf Rußpartikel bilden. [6]

3.3 Einflussfaktoren auf den dieselmotorischen Zündverzug

Aufgrund der Tatsache, dass als Ausgangsgröße bei allen Messmethoden zur Cetanzahlbestimmung der Zündverzug verwendet wird, werden hier kurz die möglichen Einflüsse auf den Zündverzug wiedergegeben.

3.3.1 Temperatur im Brennraum

Einen großen Einfluss auf den Zündverzug hat die Temperatur in der Brennkammer, in die der vergleichsweise „kalte“ Kraftstoff eingespritzt wird. In Abbildung 1 ist der dieselmotorische Zündverzug in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur dargestellt. Für niedrige Temperaturen in der Brennkammer überlagern sich dabei annähernd gleichgewichtig die Effekte der Kraftstoffverdampfung (physikalischer Zündverzug) mit denen der Oxidationsreaktionen des chemischen Zündverzugs. Sowohl der physikalische wie auch der chemische Anteil des Zündverzugs profitieren von einer steigenden Brennraumtemperatur. Bei einer Temperaturerhöhung wird jedoch die Selbstzündung zunehmend durch den physikalischen Zündverzug beeinflusst. [21] [25]



Quelle: PISCHINGER, F. et al. (2001)

Abbildung 1: Der dieselmotorische Zündverzug in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur

Cetanzahlmessgeräte mit beheizbarer Druckkammer regeln die Temperatur in der Brennkammer ausschließlich über die Wandtemperatur. Eine Unterscheidung der einzelnen Temperatureinflüsse von Brennkammerwand und Brennraum auf den Zündverzug ist somit schwer möglich. Im Dieselmotor ist die Auswirkung der Wandtemperatur auf den Zündverzug außerdem stark beeinflusst durch den Wandabstand zur Einspritzdüse sowie den Einspritzwinkel.

Bei der Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester der Firma Fueltech ist ein Auftreffen des eingespritzten Kraftstoffs auf die erhitzte Brennkammerwand unerwünscht. Aus diesem Grund, wurde die Position der Einspritzdüse und der anliegende Einspritzdruck an die Bauart der Brennkammer angepasst, so dass im Regelfall der eingespritzte Kraftstoff nicht mit der Brennkammerwand in Berührung kommt. [13]

Generell kann bei einer höheren Wandtemperatur von einem kürzeren Zündverzug ausgegangen werden, da vermehrt Oberflächenzündungen an der Wand stattfinden [21].

3.3.2 Druck im Brennraum

Mit zunehmendem Druck in der Brennkammer nimmt der Zündverzug linear ab, was neben der Abnahme des chemischen Zündverzuges auch auf eine zum Teil deutlich verbesserte Zerstäubung des Kraftstoffeinspritzstrahles und bessere Gemischaufbereitung zurückzuführen ist. [15] [21]

3.3.3 Einspritzdruck

Eine Zunahme des Einspritzdrucks bei ansonsten unverändertem Einspritzsystem führt, bei gleichzeitig verkürzter Einspritzdauer, zu einer intensiveren Kraftstoffverdampfung und damit zu einer stärkeren Gemischabkühlung. Dies kann als Ursache für den mit zunehmenden Einspritzdruck verlängerten Zündverzug angesehen werden. Des Weiteren nehmen die zyklischen Schwankungen der Lage des Zündortes zu, was auf eine stärkere Homogenisierung des Gemisches zurückgeführt werden kann. [21]

3.3.4 Eingespritzte Kraftstoffmenge

Über die eingespritzte Kraftstoffmenge wird im Motor die zugeführte Brennstoffenergie dem Leistungsbedarf angepasst. Die Einspritzmenge kann bei konventionellen Einspritzsystemen über die Einspritzdauer und den Einspritzdruck gesteuert werden. Generell wird unabhängig von der Brennkammertemperatur eine Zunahme des Zündverzugs mit zunehmender Einspritzmenge beobachtet, was auf eine größere notwendige Verdampfungsenergie sowie eine Abkühlung des Gemisches, insbesondere in der Strahlachsenzone durch nachfolgenden Kraftstoff zurückgeführt werden kann. Bei hohen Temperaturen ist dieser Zusammenhang deutlich schwächer ausgeprägt, weil hier bis zum Zeitpunkt der Selbstzündung nur geringe Unterschiede bezüglich der Strahlausbreitung und Gemischbildung auftreten. Motortechnische Messungen sprechen hin und wieder von einer Abnahme des Zündverzugs durch eine Erhöhung der Einspritzmenge – dies ist lediglich auf einen Anstieg des Temperaturniveaus im Motor, hervorgerufen durch die zusätzlich verfügbare Brennstoffenergie zurück zu führen. [21]

3.3.5 Düsenlochdurchmesser

Eine Veränderung des Düsenlochdurchmessers beeinflusst über die Veränderung des effektiven Strömungsquerschnittes den Einspritzverlauf. Mit abnehmendem Düsenlochdurchmesser nehmen dabei der Einspritzdruck und die Einspritzdauer zu. Bei konstantem Einspritzdruck verringert sich die Tropfengröße, was zu einer verbesserten Gemischbildung sowie zu einer stärkeren Absenkung der Gemischtemperatur führt. Eine Zunahme des Zündverzuges mit abnehmendem Lochdurchmesser wird temperaturunabhängig beobachtet, was auf eine stärkere Abkühlung des Gemisches zurückgeführt werden kann. Bei größerem Düsenlochdurchmesser verschlechtert sich die Gemischaufbereitung und die Zündung erfolgt in fetten, schlecht aufbereiteten Strahlbereichen, während bei kleinem Düsenlochdurchmesser der gesamte Kraftstoff zum Zündzeitpunkt verdampft ist. [21]

3.3.6 Zündwilligkeit

Die Zündwilligkeit eines Kraftstoffs hat einen direkten Einfluss auf den chemischen Zündverzug. Je zündwilliger der Kraftstoff umso höher ist seine Cetanzahl. Bei Kraftstoffen mit vergleichbaren physikalischen Eigenschaften nimmt der gemessene Zündverzug bei ansonsten unveränderten Messbedingungen mit steigender Cetanzahl ab. Es kann von einem annähernd linearen Zusammenhang ausgegangen werden. [15] [21]

3.3.7 Siedeverlauf und Viskosität

Viskosität und Siedeverhalten wirken sich auf den Einspritzvorgang sowie die Gemischaufbereitung aus. Je nach Verdampfungseigenschaften des untersuchten Kraftstoffs erfolgte die erste Selbstentzündung in unterschiedlich gut aufbereiteten Strahlbereichen. Bei höherer Viskosität kann eine Zunahme des physikalischen Zündverzugs festgestellt werden. [21]

3.3.8 Einordnung der Einflussfaktoren auf den Zündverzug

Zusammenfassend bestehen die Haupteinflüsse auf den physikalischen Zündverzug aus den Parametern Temperatur und Druck in der Brennkammer, während der chemische Zündverzug durch die Zündwilligkeit des Kraftstoffs geprägt wird [4] [25]. Eine Verbesserung der Zerstäubungsgüte, das heißt der Gemischaufbereitung im Brennraum hat, übertragen auf einen betriebswarmen Dieselmotor nur einen geringen Einfluss auf den Zündverzug. Meist kann lediglich eine Verkürzung der Brenndauer beobachtet werden. Im allgemeinen unterliegen Zündort und Zündverzug immer geringen zyklischen Schwankungen, die aus stochastischen Unregelmäßigkeiten im Einspritzstrahl herrühren [21], so dass nur allgemeine Aussagen getroffen werden können. Der Zündverzug in einem konventionellen Dieselmotor liegt je nach vorherrschenden Bedingungen bei der Kraftstoffeinspritzung in einer Größenordnung von 2 ms [4].

3.4 Zündwilligkeit von Dieseldieselkraftstoff

Die Cetanzahl dient der Bewertung von Dieseldieselkraftstoffen [11] und hat eine entscheidende Bedeutung für die Güte des Verbrennungsablaufs [6]. Sie ist ein Maß für die Zündwilligkeit von Dieseldieselkraftstoff.

Die Cetanzahlbestimmung erfolgt in einem genormten Einzylinder-Prüfmotor mit indirekter Einspritzung bei einem konstantem Zündverzug zwischen Kraftstoffeinspritzung und Selbstzündung. In der DIN EN 590 [9] ist das Cetan-Prüfverfahren mit dem CFR-Prüfmotor (Cooperative Fuel Research Committee) mit variablen Verdichtungsverhältnis nach DIN EN ISO 5165 [8] vorgeschrieben. Alternativ kann die Zündwilligkeit mit dem BASF-Prüfmotor mit verstellbarem Luftdurchsatz nach DIN 51773 bestimmt werden. Die Prüfmotoren unterscheiden sich in der Art und Weise, wie der Zündverzug konstant gehalten wird sowie in der Messgenauigkeit. Vergleicht man die maximal erlaubten Abweichungen bei Messungen mit identischem Kraftstoff zwischen zwei baugleichen Prüfmotoren (Vergleichbarkeit), so ist die Toleranz nach DIN EN ISO 5165 höher,

als nach DIN 51773. Die nach DIN EN ISO 5165 festgelegten Grenzen unterscheiden sich je nach Cetanzahlniveau des untersuchten Kraftstoffs. So ergibt sich eine maximal zugelassene Abweichung für die Vergleichbarkeit von 2,8 bis 4,8 CN nach DIN EN ISO 5165 und von maximal 2 CN nach DIN 51773 für den BASF Prüfmotor. Die nach DIN 51773 ermittelten Cetanzahlen müssen um den Faktor 1,5 korrigiert werden bevor sie mit den Ergebnissen nach DIN EN ISO 5165 verglichen werden können [9]. Die zulässige Abweichung für die Vergleichbarkeit ist für den CFR Motor demnach höher als für den BASF Motor. Die festgelegte maximale Spannweite für die Wiederholbarkeit der Messergebnisse beträgt 1 CN für den BASF Prüfmotor, für den CFR-Prüfmotor variiert diese wiederum je nach Cetanzahlniveau und liegt zwischen 0,8 und 1 CN. Zusätzlich darf bei 20 durchgeführten Cetanzahlmessungen nach DIN EN ISO 5165 ein Messpunkt außerhalb der Spanne der Vergleichbarkeit sowie der Wiederholbarkeit liegen [9] [10].

Bei der Cetanzahlmessung werden die Verbrennungseigenschaften des zu bestimmenden Kraftstoffs im jeweiligen Prüfmotor unter konstanten Betriebsbedingungen mit den Verbrennungseigenschaften von Mischungen aus Bezugskraftstoffen bekannter Cetanzahl verglichen. Als Referenz dient ein Kraftstoffgemisch aus Cetan und α -Methyl-Naphthalin, wobei für den Vergleichskraftstoff Cetan eine Cetanzahl von 100 festgelegt wurde, für α -Methyl-Naphthalin die Cetanzahl 0. Die chemischen Strukturformeln der Bezugskraftstoffe sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt.

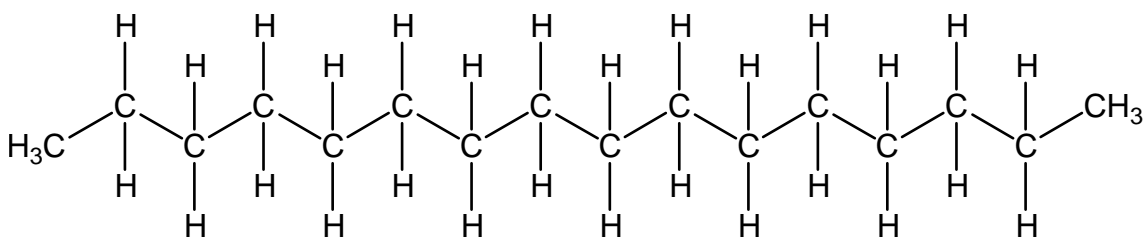


Abbildung 2: Cetan ($C_{16}H_{34}$) – Cetanzahl 100

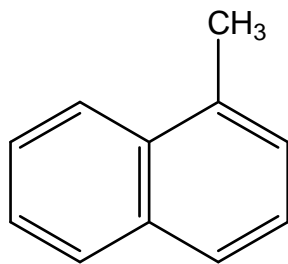


Abbildung 3: α -Methyl-Naphthalin ($C_{11}H_{10}$) – Cetanzahl 0

Die Motoreinstellung wird für den zu messenden Kraftstoff an den vorgegebenen Zündverzug angepasst. Eine Mischung aus x % Cetan und $(100-x)$ % α -Methyl-Naphthalin welche diesen Zündverzug aufweist, bestimmt somit die Cetanzahl x des untersuchten Dieselmotorkraftstoffs [8] [10].

Statt der beschriebenen primären Bezugskraftstoffe finden heute meist sekundäre Bezugskraftstoffe Verwendung, die immer noch erst anhand eines Cetan/ α -Methyl-Naphthalin Gemischs kalibriert werden, bevor sie als Referenzkraftstoffe in den Handel gelangen. In der Praxis wird vorwiegend auf ein Gemisch aus den ASTM-Kraftstoffen der T-Reihe (Hoch-Cetan) und der U-Reihe (Niedrig-Cetan) zurückgegriffen. Diese Referenzkraftstoffe sind billiger, einfacher zu handhaben und haben eine wesentlich höhere Oxidationsstabilität, als die anfangs beschriebenen primären Bezugskraftstoffe. Schon 1962 wurde α -Methyl-Naphthalin als Primärstandard aus den oben genannten Gründen durch Isocetan (Heptamethylnonan), mit einer Cetanzahl von 15, ersetzt. [10]

Alternativ wird teilweise auch der Cetanindex als Maßstab verwendet. Dieser wird jedoch aus Dichte und Siedeverlauf berechnet und kann eine Cetanzahlerhöhung aufgrund von Additiven nicht berücksichtigen. [1] [4] [6]

Nach DIN EN 590 [9] muss handelsüblicher Dieselmotorkraftstoff mindestens eine Cetanzahl von 51 aufweisen.

3.5 Zündwilligkeit von Rapsölkraftstoff

Für die Messung der Zündwilligkeit von Rapsölkraftstoff steht weder ein geeigneter Prüfmotor, noch eine Prüfvorschrift zur Verfügung. Durch die höhere Viskosität von Rapsöl im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff verschlechtert sich die Qualität der Einspritzung und somit auch die Kraftstoffzerstäubung im Prüfmotor bei gleicher Einstellung im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Die daraus resultierenden größeren Kraftstofftropfen können in einem auf Dieselmotorbetrieb optimierten Motortakt nicht restlos verbrennen, was zu Verkokungen bereits nach kurzer Prüfdauer führt. BIRKNER (1995) [5] weist darauf hin, dass eine Cetanzahlmessung von Rapsöl im Prüfmotor nur durch Ansaugluft- und Kraftstoffvorwärmung möglich ist, wobei hierbei große Schwankungen bei den Messergebnissen festzustellen sind. Eine andere Möglichkeit der Cetanzahlmessung mit einem Prüfmotor beschreibt WIDMANN (1992) [26]. Hierbei wird der Einspritzdruck von 125 auf 160 bar erhöht und der Rapsölkraftstoff auf 45 bis 50 °C vorgewärmt. Trotzdem wurde die Bildung trompetenförmiger Ablagerungen an den Einspritzdüsen, Ablagerungen im Brennraum und zum Teil eine unregelmäßige Zündung im Motor festgestellt. Eine Umrüstung der vorhandenen Prüfmotoren auf Pflanzenölbetrieb für eine Vergleichbarkeit der Zündwilligkeit mit Dieselmotorkraftstoff wurde als zu aufwändig und kostenintensiv eingestuft [23].

Nach PISCHINGER et al. (2001) [21] ist die im Prüfmotor bestimmte Cetanzahl nur eingeschränkt geeignet, um die Zündeigenschaften von unterschiedlichen Kraftstoffgruppen, wie Dieselmotorkraftstoff, reinen Kohlenwasserstoffen, oder alternativen Kraftstoffen zu beschreiben. Dies wird auf die unzureichende Berücksichtigung spezieller Randbedingungen bei der Cetanzahlmessung, wie z.B. das Verdampfungsverhalten zurückgeführt. HEMMERLEIN (1991) [16] stellt fest, dass die Messergebnisse für die Cetanzahl von Rapsölkraftstoff deutlich niedriger sind als die für

Dieselmotorkraftstoff. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass im realen Motorbetrieb Zündverzögerung und Verbrennungsverlauf ähnlich sind. Die von WIDMANN (1992) [26] im Prüfmotor gemessene Cetanzahl von Rapsölkraftstoff ohne Lagerungseinfluss lag bei $CN = 39,5$.

Der chemische Zündverzögerung von Rapsöl liegt nach PISCHINGER et al. (2001) [21] sogar rund 25 % unter dem Wert von Dieselmotorkraftstoffen ähnlicher Cetanzahl, was auf einen hohen Sauerstoffgehalt sowie auf eine unzureichende Aussagekraft bei einer herkömmlichen Cetanzahlmessung von Pflanzenölkraftstoffen auf die Zündwilligkeit zurückgeführt wird.

FIEWEGER (1996) [11] beschreibt, dass durch die Verwendung von standardisierten Prüfverfahren und genormten Prüfmotoren zur Bestimmung der Cetanzahl keine all-gemeingültige Aussage über die Zündwilligkeit des untersuchten Kraftstoffes für den motorisch relevanten Bereich gemacht werden kann. So machen allein schon das veraltete Motordesign, sowie das Verbrennungsverhalten der Prüfmotoren die Ergebnisse unrepräsentativ für moderne Motortechnologien und Entwicklungen wie z. B. Pumpe-Düse oder Common-Rail-Einspritzverfahren [11]. Des Weiteren steht die unter dieselmotorischen Standardbedingungen ermittelte Cetanzahl nicht immer im direkten Zusammenhang zur chemischen Zündverzögerungszeit. Alternative Kraftstoffe wie zum Beispiel Rapsöl oder auch Alkohole mit Zündbeschleunigern zeigen im motorischen Betrieb oft bessere Laufeigenschaften, als ihre ermittelte Zündwilligkeit vermuten lässt. Ein direkter Vergleich von Kraftstoffen ist deshalb meist nur für ähnliche Stoffgruppen, wie die verwendeten Referenzkraftstoffe möglich [11] [21].

Es existieren daher eine Reihe von Vorschlägen für alternative Verfahren zur Bestimmung der Zündwilligkeit eines Kraftstoffes. Diese reichen von der Umrechnung der Oktanzahl in die Cetanzahl, durch die insbesondere die Erweiterung des Messbereichs der Prüfmotoren für schwerentzündliche Kraftstoffe erreicht werden soll, bis hin zu nicht motorischen Verfahren, die nicht mehr an spezielle Prüfmotoren gebunden sind. Es handelt sich hierbei entweder um Verbrennungsreaktoren mit beheizbaren Druckkammern, oder um einen formelmäßigen Zusammenhang zwischen messbaren physikalischen und chemischen Kraftstoffeigenschaften [11].

Die Cetanzahl von Pflanzenölkraftstoffen, wie z.B. Rapsöl wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Vergleicht man die Cetanzahl gleichwertiger Kohlenwasserstoffe, so verringert sich die Zündwilligkeit mit steigender Anzahl von Mehrfachbindungen [14]. WIDMANN (1992) [26] beschreibt einen Anstieg der im Prüfmotor gemessenen Cetanzahl von Rapsölkraftstoff in Verbindung mit steigender Peroxidzahl, beeinflusst durch die Dauer der Lagerung. Durch Alterungsprozesse tritt eine Sättigung (Oxidation) vorhandener Doppel- oder Dreifachbindungen ein. Die beschriebene Zündwilligkeitserhöhung kann auf die zusätzliche O₂-Einbringung durch Oxidationsvorgänge im Öl zurückgeführt werden [26]. Des Weiteren erhöht sich die Zündwilligkeit von aliphatischen Kohlenwasserstoffen mit wachsender Anzahl an C-Atomen. Untersuchungen ergaben einen lineareren Zusammenhang zwischen der Anzahl der C-Atome und der Cetanzahl [14]. Cetanzahlbestimmungen von verschiedenen Pflanzenölen sowie deren Methylestern mit einem Fuel Ignition Analyser (FIA) ergaben eine Cetanzahlerhöhung bei höheren Kraftstofftemperaturen [2]. Bei Versuchen mit einem Fuel Ignition Tester konnte eine Beeinflussung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff durch die Kraftstofftemperatur, im Bereich von 50 °C bis 90 °C, nicht nachgewiesen werden [22].

3.6 Alternative Prüfmethode zur Bestimmung der Zündwilligkeit

Zur Zeit existieren zwei Messgeräte mit konstantem Brennkammervolumen zur Zündwilligkeitsbestimmung von Dieselkraftstoff, einerseits der Fuel Ignition Tester (FIT) und andererseits der Ignition Quality Tester (IQT). Beide Messgeräte beruhen auf dem selben Messprinzip. Hierbei werden die Strömungen im Brennraum sowie die Kolbenbewegungen, die normalerweise in einem Dieselmotor herrschen, vernachlässigt. Die Verbrennung findet in einer temperierten Brennkammer mit konstantem Volumen statt. Somit kann der gesamte Zündverzug eines Kraftstoffes, also die Summe aus physikalischem und chemischem Anteil, unter annähernd konstanten thermodynamischen Messbedingungen ermittelt werden. Es kann von einer direkten Beeinflussung der gemessenen Zündverzugszeiten durch den jeweiligen chemischen Zündverzug des untersuchten Kraftstoffs ausgegangen werden.

Zur Bestimmung der Zündwilligkeit wird der Kraftstoff in einen Hochdruckzylinder (Brennkammer) eingespritzt, in dem sich verdichtete erhitzte Luft befindet. Kurz nach der erfolgten Einspritzung des Kraftstoffs in den Brennraum zündet das Kraftstoff-Luft-Gemisch und verbrennt, wobei die Zeit vom ersten Düsennadelhub bis zur Selbstentzündung gemessen wird. Der Zündzeitpunkt des eingespritzten Kraftstoffes wird über den Druckanstieg in der Brennkammer definiert und daraus der Zündverzug ermittelt. Unter Zuhilfenahme vorher erstellter Referenzkurven von Kraftstoffen mit bekannter Cetanzahl (Bezugskraftstoffe), können Rückschlüsse auf die in einem Prüfmotor zu erwartende Cetanzahl gezogen werden.

Die Cetanzahlmessung mit alternativen Prüfverfahren bringt eine Reihe von Vorteilen im Vergleich zu der bisher üblichen Methode in einem Prüfmotor mit sich. Die Temperatur sowie der Druck im Verbrennungsraum, kann variiert werden, so dass diese beiden bei der Selbstzündung in einem Prüfmotor normalerweise eng aneinander gekoppelten Parameter getrennt voneinander betrachtet werden können. Außerdem kann über die Kraftstofftemperatur die Viskosität der zu untersuchenden Kraftstoffe eingestellt werden. Weitere Vorteile sind die vollautomatisierte Messung, die Möglichkeit einer graphischen Auswertung sowie das vergleichsweise geringe Probenvolumen des zu untersuchenden Kraftstoffs. So wird für eine Cetanzahlmessung lediglich 0,05 l einer Kraftstoffprobe benötigt, im Gegensatz zu ca. 2 l bei der Verwendung eines Prüfmotors. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Einspritzdüsen auszutauschen.

Als Nachteil in Bezug auf die Messung von Zündverzugszeiten bleiben der Einfluss der Gemischbildung sowie die mit der Verdampfung des Kraftstoffs verbundene Temperaturabsenkung im Einspritzstrahl [11]. REMMELE (2002) [22] stellte außerdem eine zu geringe Wiederholbarkeit bei Versuchen mit einem Fuel Ignition Tester fest. Die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN EN ISO 5165 konnten nicht eingehalten werden. Eine objektive Datenanalyse der gewonnenen Messdaten unter Zuhilfenahme statistischer Methoden ist vom Gerätehersteller nicht vorgesehen. Somit können eventuell vorhandene Ausreißer bei den ermittelten Zündverzugszeiten das Messergebnis verfälschen. [22]

Der Fuel Ignition Tester ist eine Weiterentwicklung des Fuel Ignition Analyser (FIA-100). Der FIA-100 wurde von der Firma Fueltech AS/Trondheim speziell zur Untersuchung von hochviskosem Marineschweröl entworfen. Untersuchungen mit einem Fuel Ignition Analyser wurden unter anderem von FISKAA und WHITE (1994) [12] sowie TAKEDA, SHIODE und FISKAA (2001) [24] dokumentiert. Erste Untersuchungen zur Eignung des FIA und FIT für die Cetanzahlmessung von Diesel- und Rapsölkraftstoff sind von DATSCHEFSKI und RICKEARD (1993) [7], REMMELE (2002) [22] sowie AUERBACH (2003) [2] durchgeführt worden.

Alternativ zum Fuel Ignition Tester gibt es, wie bereits erwähnt, von der Firma AET (Advanced Engine Technology Ltd.) ein Messgerät mit ähnlichem Funktionsprinzip und Leistungsumfang, das unter dem Namen IQT (Ignition Quality Tester) vornehmlich außerhalb Europas vertrieben wird. Europaweit sind bis jetzt lediglich Apparate der Firma Fueltech AS im Einsatz (FIA-100 Fuel Ignition Analyser beziehungsweise FIT Fuel Ignition Tester). Da es sich bei beiden Geräten (IQT und FIT) um relativ neuartige Produktentwicklungen handelt, können noch keine Aussagen über Unterschiede in der Eignung oder Verwendbarkeit gemacht werden.

4 Zielstellung

Erste Versuche von REMMELE (2002) [22] mit einem Fuel Ignition Tester zeigten die grundsätzliche Eignung des Messgeräts für die Cetanzahlbestimmung von Rapsölkraftstoff. Für eine mit Dieselkraftstoff vergleichbare Cetanzahlbestimmung von Rapsölkraftstoff, mit den Anforderungen an eine hohe Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit, ist es jedoch notwendig, eine verbindliche Prüfmethode zu entwickeln.

Ziel des Untersuchungsvorhabens ist es, eine Prüfmethode für die Bestimmung der Zündwilligkeit, beschrieben durch die Cetanzahl, von Rapsölkraftstoff mit dem Messgerät „Fuel Ignition Tester“ zu entwickeln und festzuschreiben. Durch die Prüfmethode soll eine hohe Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse sichergestellt werden. Dies beinhaltet sowohl die Untersuchung der Einflüsse der einzelnen Messparameter auf das Messergebnis als auch die Adaptierung der Regelalgorithmen, von denen eine optimierte Geräteeinstellung abgeleitet werden soll. Hierzu sollen auch Untersuchungen mit Dieselkraftstoff durchgeführt werden. Des Weiteren sollen statistische Methoden zur Ausreißeridentifikation recherchiert und auf eine Auswirkung hinsichtlich einer Verbesserung der Wiederholbarkeit geprüft werden. Mit den festgelegten Messparametern und Einstellungen sowie unter Zuhilfenahme der statistischen Auswertung der Messergebnisse, sollen anschließend an mehreren Rapsölkraftstoffproben Cetanzahlmessungen mit dem Fuel Ignition Tester durchgeführt werden. Die entwickelte Prüfmethode mit den von der Standardeinstellung abweichenden Messparametern soll abschließend dokumentiert werden.

5 Methodisches Vorgehen

5.1 Aufbau der Messeinrichtung

Für die Zündwilligkeitsbestimmung steht ein Fuel Ignition Tester (Gerätenummer: 002.05.0601) der Firma Fueltech AS zur Verfügung. Abbildung 4 zeigt die Brennkammer sowie die Einspritzeinheit des Fuel Ignition Testers, in Abbildung 5 ist der schematische Aufbau des Messgeräts dargestellt.

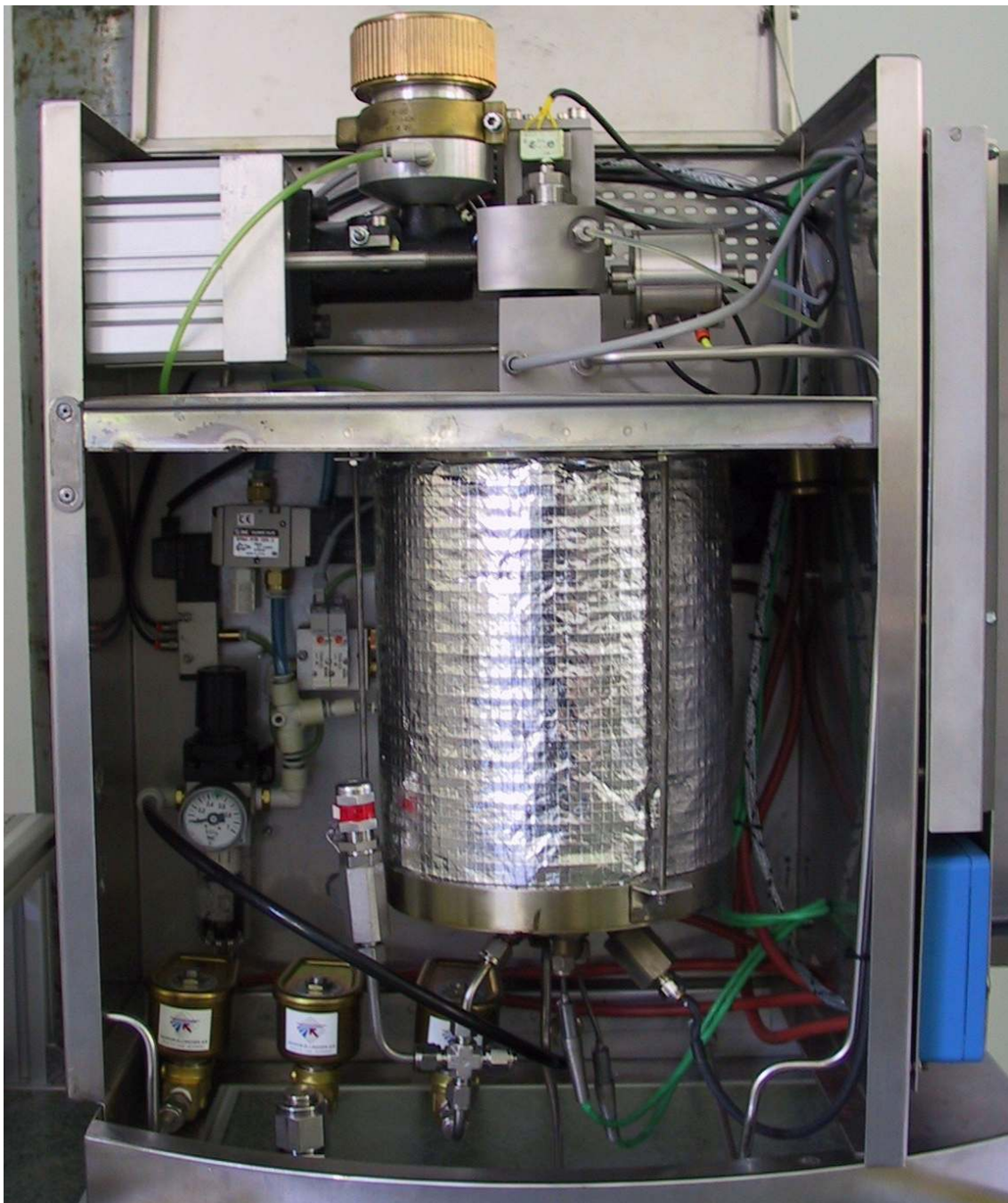
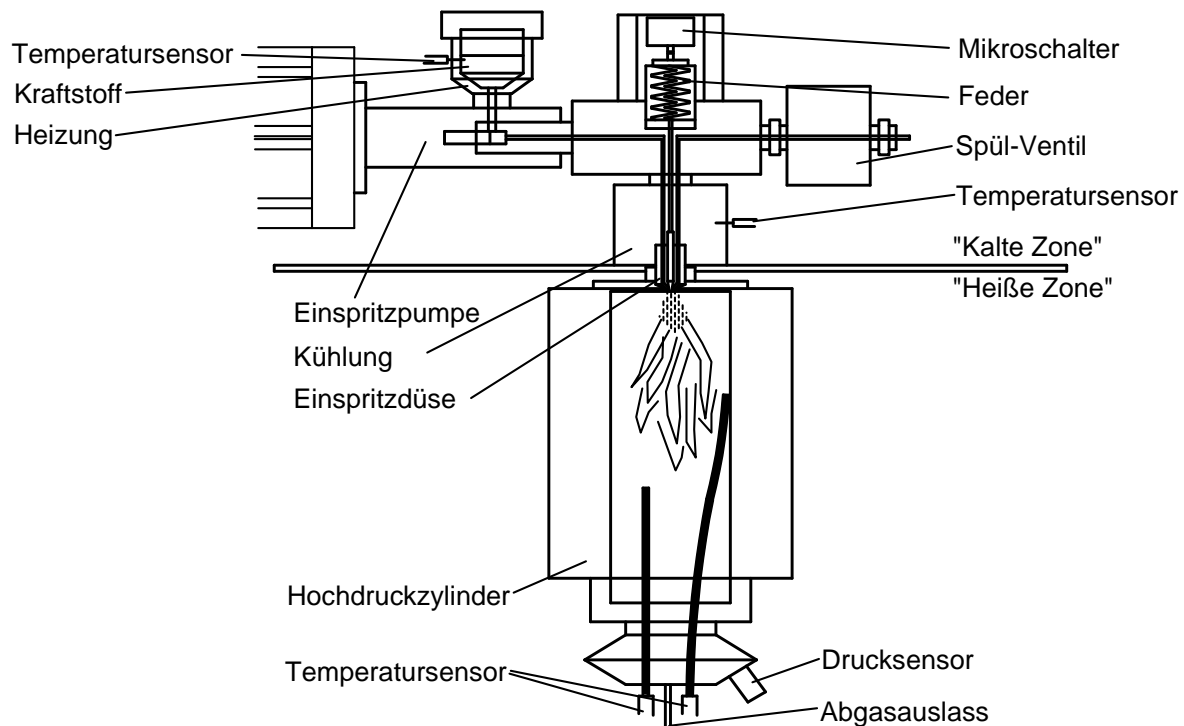


Abbildung 4: Brennkammer und Einspritzeinheit des FIT



Quelle: nach Fueltech AS, Trondheim, Norwegen

Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Fuel Ignition Tester

Der Fuel Ignition Tester besteht aus einem beheizbaren Hochdruckzylinder, einem Einspritzsystem mit austauschbarer Einspritzdüse, der Sensorik zur Aufnahme der Druckdaten und der Temperaturen in der Verbrennungskammer sowie einer speziellen Mikroprozessorsteuerung. Der FIT ist in zwei Bereiche aufgeteilt – die „kalte Zone“ mit der Einspritzeinheit und dem Kraftstoffbehälter sowie die „heiße Zone“, in der sich die Verbrennungskammer befindet. Die Regelungselektronik befindet sich in einem separaten Gehäuse an der Außenseite des Messgeräts.

Zur Zündwilligkeitsbestimmung wird der Kraftstoff in den Hochdruckzylinder eingespritzt, in dem sich verdichtete erhitzte Luft befindet. Die Einspritzung erfolgt durch eine Bosch Einspritzpumpe, die mit einem Spitzeneinspritzdruck von 400 bar arbeitet. Für die Messungen wurde ein Einspritzdruck von 380 bar eingestellt. Die Temperatur des Hochdruckzylinders (Brennraum) und damit die Verbrennungstemperatur kann ebenso wie der vorherrschende Druck der Verbrennungsluft vorgewählt werden. Um eine optimale Einspritzung zu gewährleisten kann der zu untersuchende Kraftstoff bei Bedarf vorgewärmt werden. Kurz nach der erfolgten Einspritzung des Kraftstoffs in den Brennraum zündet das Kraftstoff-Luft-Gemisch und verbrennt, wobei der Druckverlauf im Hochdruckzylinder bei der Verbrennung gemessen sowie anschließend ausgewertet und auch graphisch ausgegeben wird. Der Zündzeitpunkt des eingespritzten Kraftstoffes wird über den gemessenen Druckanstieg in der Brennkammer definiert. Die Zeitspanne von der erfolgten Einspritzung (bestimmt über den Düsennadelhub) bis zum Zünden des Kraftstoff-Luft-Gemisches ist als Zündverzögerung definiert.

Die Anzahl der Einspritzungen kann vom Benutzer softwareseitig eingestellt werden. Begrenzender Faktor ist lediglich das Volumen des Kraftstoffbehälters, das je nach Einspritzpumpeneinstellung Kraftstoff für bis zu maximal 30 Einspritzungen bevorratet. Der Hersteller schreibt 20 Einzelspritzungen vor, aus denen der Mittelwert berechnet und für die FIT-Cetanzahlbestimmung verwendet wird. Über das Spülventil werden die Zulaufbohrungen der Einspritzdüse sowie die gesamte Einspritzeinheit nach erfolgter Kraftstoffinjektion mit Kraftstoff gespült, um eventuelle Verunreinigungen durch Verbrennungsrückstände zu entfernen. Des Weiteren können restliche Kraftstoffmengen vor einem Kraftstoffwechsel aus dem Einspritzsystem ausgeblasen werden.

Das Messgerät ist an die serielle Schnittstelle eines Messrechners angeschlossen und wird über eine spezielle Steuerungssoftware (Versionsnummer: 4.62) angesprochen und bedient. Die Regelung übernimmt der Mikroprozessor, wobei eine Steuerung von Hand ebenfalls möglich ist. Die gewonnenen Daten werden auf dem Messrechner gespeichert und können mit Hilfe des FIT-Plot Programms ausgewertet werden. Das FIT-Plot Programm vergleicht die Zündverzüge der vorher erstellten Referenzkurven mit den gemessenen Zündverzugszeiten der jeweiligen Kraftstoffproben. Für jede Änderung der Versuchsbedingungen muss eine eigene Referenzkurve erstellt werden. Nur so kann ein Rückschluss auf die in einem Prüfmotor zu erwartende Cetanzahl erfolgen. Die Software errechnet automatisch den jeweiligen Mittelwert des Zündverzugs sowie die Standardabweichung der Einzelmessungen, des Weiteren wird der ROHR-Index (rate of heat release) ausgegeben. Der Mittelwert der Zündverzüge aus den Einzelmessungen wird mit der entsprechenden Referenzkurve verglichen und die zugehörige Cetanzahl ermittelt. Die einzelnen Zündverzüge werden sowohl in Tabellenform, wie auch graphisch ausgegeben. Zudem kann die Verteilung der Zündverzüge in Form eines Balkendiagramms eingesehen werden.

Die Steuerung der Einspritzeinheit sowie der damit verbundenen Spülventile des FIT erfolgt pneumatisch, aus diesem Grund wird ein Kompressor für die Druckluftversorgung mit einem Betriebsdruck von 5 bar benötigt. Um eine Überhitzung der Einspritzeinheit zu vermeiden, wird die Einspritzdüse des Messgeräts mit einem Kühlmantel über einen Kryostat temperiert. Die Ventile für die Befüllung und Druckregulierung der Brennkammer werden elektromagnetisch betätigt. Der Druck in der Verbrennungskammer wird mit Hilfe einer Pressluftflasche (maximaler Fülldruck 150 bar) aufgebaut.

Der in Abbildung 5 eingezeichnete Mikroschalter wurde vom Hersteller im Rahmen einer Überholung des Messgerätes während des Untersuchungszeitraums durch einen analogen, kapazitiven Wegesensor ersetzt. Dieser ermöglicht eine exaktere Positionsbestimmung der Düsenadel während des Einspritzvorgangs und somit eine genauere Festlegung des Einspritzzeitpunktes über den Düsenadelhub. Des Weiteren kann nun auch die Justierung softwareseitig überprüft werden. In den folgenden Kapiteln wird Messgerät im Zustand nach der Wartung, als FIT-1 bezeichnet.

Im wesentlichen werden folgende Messwerte bei der Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester erfasst:

- Druckverlauf in der Brennkammer
- Kraftstofftemperatur im Kraftstoffbehälter
- Temperatur der Kühlflüssigkeit im Kühlmantel der Einspritzeinheit
- Brennkammertemperatur
- Temperatur der Brennkammerwand

5.2 Durchgeführte Vorversuche

Die Vorversuche dienten der Einarbeitung des Versuchsdurchführenden in die Messmethodik bei der Zündwilligkeitsbestimmung mit dem Fuel Ignition Tester. Außerdem wurde das Verhalten des Messgeräts auf eine Veränderung der Messparameter untersucht.

Als Grundlage für die Optimierung der Messgeräteeinstellung wurden die unterschiedlichen, vom Gerätehersteller vorgesehenen Einstellungen für die Messung von Marineschweröl und Dieseldieselkraftstoff auf ihre Auswirkung auf die Güte der Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester verglichen. Die Möglichkeit der Schwerölmessung ist in der vom Gerätehersteller aktualisierten Softwareversion des FIT-1 jedoch nicht mehr implementiert.

In den Vorversuchen konnte eine Unregelmäßigkeit des Druckverlaufs in der Brennkammer zu Beginn der ersten Einzelmessung, bei Verwendung der vom Hersteller empfohlenen Einstellung, festgestellt werden. In weiteren Vorversuchen wurden die nötigen Einstellungen bei einer Druck-erhöhung im Brennraum, in Bezug auf die Regelungsparameter, erarbeitet.

Es konnte außerdem eine Verkürzung der Zündverzüge bei der Messung von Dieseldieselkraftstoff unter unveränderten Messbedingungen festgestellt werden (siehe 6.6).

5.3 Methodenentwicklung

Um einen Vergleich zwischen der Zündwilligkeitsbestimmung mit dem Fuel Ignition Tester und der praxisüblichen Methode mit einem Prüfmotor nach DIN 51773 ziehen zu können, muss der Fuel Ignition Tester zuerst auf die Messung von Dieseldieselkraftstoff hin optimiert werden. Dies dient der Überprüfung der in der Norm verankerten Grenzen für die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit.

Kenntnisse über das Messverhalten mit Dieseldieselkraftstoff sind nicht nur für einen direkten Vergleich der Messgenauigkeit (Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit) des FIT mit einem Prüfmotor

tor wichtig, sondern sie bieten auch die Möglichkeit bei anschließenden Messungen mit Rapsölkraftstoff die Funktionalität des Messgeräts durch Vorab- und Vergleichstests mit Dieselmotorkraftstoff sicherzustellen.

Hierzu werden die Einflüsse der im Kapitel 5.4 aufgeführten Messparameter auf das Messergebnis untersucht und anhand der Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit bewertet. Die in der DIN 51773 festgelegten Grenzen für die Vergleichbarkeit bezieht sich hierbei jedoch auf die Zündwilligkeitsbestimmung einer identischen Kraftstoffprobe in zwei Prüfmotoren und soll lediglich eine bessere Beurteilung des Messverfahrens ermöglichen.

Abschließend werden die am besten bewerteten Einstellungen für die Anwendung bei Rapsölkraftstoff überprüft. Nach Festlegung der entwickelten Prüfmethode werden mehrere Rapsölkraftstoffproben aus der Praxis mit dem Fuel Ignition Tester auf ihre Cetanzahl hin überprüft.

Zudem soll der von WIDMANN (1992) [26] beschriebene Anstieg der im Prüfmotor gemessenen Cetanzahl von Rapsölkraftstoff in Verbindung mit steigender Peroxidzahl nochmals untersucht werden. Des Weiteren werden die zur Beurteilung des Alterungsgrades eines Rapsölkraftstoffes wichtigen Kenngrößen Neutralisationszahl und Oxidationsstabilität ebenfalls auf eine Korrelation mit den gemessenen Cetanzahlen untersucht.

5.4 Messtechnisch relevante Parameter

Neben einer Anzahl von Sicherheitsparametern, über die lediglich eine mögliche Fehlfunktion des Fuel Ignition Tester erkannt und ein kontrolliertes Abschalten des Messgeräts initialisiert wird, gibt es frei konfigurierbare Variablen, über die die Messbedingungen vor und während der Messung sowie die Steuerung und Regelalgorithmen festgelegt werden. Für die leichtere Einordnung wird im Folgenden zwischen Messbedingungs- und Regelungsparameter unterschieden. Die Einstellung der Kühlwassertemperatur wird in dieser Aufstellung nicht berücksichtigt, da diese über einen Kryostat eingestellt wird und somit keiner Regelung durch den FIT bedarf.

Parameter der Messbedingungen

Über sogenannte „Referenzwerte“ können die Bedingungen für die Messung softwareseitig eingestellt werden. Zur Auswahl stehen hierbei die Parameter

- Brennkammerdruck,
- Brennkammertemperatur ,
- Brennkammerwandtemperatur,
- verbleibender Restdruck nach der Abgasentleerung und
- Kraftstofftemperatur,

wobei die Temperatur in der Brennkammer über die aufgeheizte Kammerwand gesteuert wird. Außerdem können

- die Anzahl der Messungen,
- die Zeit zwischen den Einspritzungen,
- die Dauer des Spülvorgangs der Einspritzdüse,
- die Zeitverzögerung zwischen Spülvorgang und erneuter Messung,
- sowie die Minimalzeit, in der konstante Messbedingungen herrschen müssen,

eingestellt werden.

Regelungsparameter

Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Regelungsvariablen und Algorithmen zu verändern. Folgende Parameter können der jeweiligen Messung angepasst werden:

- der Anfangs- sowie der maximale Fülldruck der Brennkammer,
- die erlaubte Schwankung des eingestellten Kammerdrucks sowie der Wandtemperatur und
- der Regelalgorithmus für die Brennkammer- und Kraftstofftemperatur.

5.5 Auswahl der Voreinstellungen für die Messung von Dieselkraftstoff

Um eine Vergleichbarkeit der Zündwilligkeitsbestimmung mit dem Fuel Ignition Tester zu der Cetanzahlmessung mit einem Prüfmotor nach DIN 51773 zu erhalten, muss das Messgerät zuerst auf den Betrieb mit Dieselkraftstoff hin optimiert werden. Sämtliche Messreihen werden mit einem handelsüblichen Dieselkraftstoff, dessen Cetanzahl vorab mit einem BASF-Prüfmotor und einem CFR-Prüfmotor überprüft wurde, durchgeführt.

Zielgrößen der Messreihen mit Dieselkraftstoff sind eine möglichst hohe Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit der Messungen, das heißt eine möglichst geringe Anzahl an Ausreißern bei der Cetanzahlbestimmung mit dem FIT.

5.5.1 Anzahl der Einzelmessungen (Einspritzungen)

Die Anzahl der Einspritzungen kann für jede Messung frei gewählt werden. Begrenzender Faktor ist hierbei lediglich das Volumen des Kraftstoffbehälters. Je nach Einspritzpumpeneinstellung können bis zu maximal 30 Einspritzungen pro Messung durchgeführt werden. Für den Normalbetrieb empfiehlt der Hersteller 20 Einzelmessungen um ein gesichertes Ergebnis zu erhalten. Im Folgenden soll festgestellt werden, ob auch mit weniger Einspritzungen eine gesicherte Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester möglich ist. Es werden daher Varianten mit 10, 15 und 20 Einzelmessungen untersucht. Untersuchungen mit einem FIA-100 Messgerät der Firma Fuel-Tech AS, das auf einem ähnlichen Messprinzip beruht, zeigten keine Beeinflussung der Messergebnisse durch eine Erhöhung der Anzahl an Einspritzungen von 14 auf 32 [2].

5.5.2 Regelungsparameter

Um die Wiederholbarkeit der Cetanzahlmessungen mit dem FIT zu erhöhen, sollen die erlaubten Schwankungen des Regelbereichs des Messgeräts soweit wie möglich reduziert werden. Aus diesem Grund wird der Hysteresewert des Brennkammerdrucks (chamber pressure hysteresis) sowie der verbleibende Restdruck (emptying pressure limit) nach erfolgter Einspritzung und Zündung des Kraftstoffs herabgesetzt. Über diese Einstellungen sollen eventuelle Schwankungen des Kammerdrucks während den Einzelmessungen als auch verbleibende Verbrennungsgase in der Brennkammer minimiert werden.

Weiterhin wird vor jeder Messung die entleerte Brennkammer mit ca. 16 bar Druckluft befüllt. Die anschließende Regulierung des Drucks erfolgt, nachdem sich die eingeströmte kalte Luft auf die eingestellte Temperatur erwärmt und ausgedehnt hat. Idealerweise sollte die Mikroprozessorsteuerung eventuelle Schwankungen ausgleichen, häufig wurden in Vorversuchen jedoch Unregelmäßigkeiten zu Beginn der Messung beobachtet. Um dies zu vermeiden werden die für die Regelung des anfänglichen Fülldrucks zuständigen Parameter „chamber start pressure“ und „filling pressure limit“ von 16 bar auf 15 bar sowie von 18 bar auf 19 bar abgeändert, da dies in Vorversuchen eine positive Auswirkung auf die Regelungsgüte des Brennkammerdrucks zeigte.

Die Ergebnisse mit diesen modifizierten Einstellungen werden mit Messungen unter Standardeinstellung verglichen.

5.5.3 Brennkammerdruck

Der Zündverzugs steht im linearen Zusammenhang mit dem Brennkammerdruck. Mit zunehmendem Kammerdruck verbessert sich die Einspritzung, darum sollte dieser so hoch wie möglich gewählt werden, um eine gleichmäßige Zerstäubung zu erzielen. Die Herstellerangabe beträgt 20 bar für den Brennkammerdruck. Im Falle einer unvollständigen Verbrennung des Kraftstoffs in der Brennkammer empfiehlt der Hersteller eine Erhöhung des Kammerdrucks um 5 bar. So soll eine bessere Strahlausbreitung, durch die druckbedingt bessere Zerstäubungsgüte, erreicht werden. Für die Untersuchungen werden Messungen mit einem Kammerdruck von 20, 25 und 30 bar durchgeführt.

5.5.4 Brennkammertemperatur

Die Brennkammertemperatur wird vom Hersteller mit 500° C vorgegeben. Aus Abbildung 1, Seite 17 ist zu entnehmen, dass die Beeinflussung des Zündverzugs durch Temperaturschwankungen im Verbrennungsraum mit steigender Brennkammertemperatur abnehmen. Aus diesem Grund sollte diese möglichst hoch gewählt werden. Es werden deshalb Untersuchungen bei einer Brennkammertemperatur von 475° C, 500° C sowie 525° C durchgeführt.

5.5.5 Einspritzdruck

Eine Veränderung des Einspritzdrucks ist vom Hersteller nicht vorgesehen, die Kraftstoffeinspritzung erfolgt mit 380 bar.

5.5.6 Einspritzdüsenlochdurchmesser

Bei der Kraftstoffeinspritzung sollte durch die Wahl einer geeigneten Einspritzdüse eine möglichst gute Zerstäubung des Kraftstoffs erzielt werden. Die Zerstäubungsgüte ist abhängig von der Viskosität des Kraftstoffs, dem Druck im Brennraum, dem Einspritzdruck und dem Einspritzdüsenlochdurchmesser. Für die Messungen mit dem Fuel Ignition Tester standen zwei Einspritzdüsen mit einem Düsenlochdurchmesser von 0,25 mm und 0,35 mm zur Verfügung.

5.5.7 Kraftstofftemperatur

Über die Temperatur wird die Viskosität des zu untersuchenden Kraftstoffs beeinflusst. Grundsätzlich gilt, je niedriger viskos ein Kraftstoff ist, umso besser erfolgt die Zerstäubung.

Bei Messungen mit einem Fuel Ignition Tester von REMMELE (2002) [22] konnte kein Einfluss der Kraftstofftemperatur auf den Zündverzug festgestellt werden. Aus diesem Grund wird die Kraftstofftemperatur bei allen Varianten auf 50 °C eingestellt. So kann eine Bauart bedingte Erwärmung des Kraftstoffes im Verlauf einer Messung ausgeschlossen werden.

5.5.8 Kraftstoffmenge

Wird die eingespritzte Kraftstoffmenge erhöht, verschlechtert sich die Strahlausbreitung. Dies lässt sich auf größere Abkühlung beim Verdampfen des Kraftstoffes in der Verbrennungskammer zurückführen. Aus diesem Grund sollte bei dieser Einstellung die minimal vom Hersteller empfohlene Einspritzmenge angestrebt werden. Um jedoch eine optimale Funktion des Messgeräts zu gewährleisten, muss laut Herstellerangabe die Kraftstoffmenge dahingehend eingestellt werden, dass der entstehende Verbrennungsspitzenruck bei ca. 8 bar liegt. Wird diese Druckspitze erheblich unterschritten, wertet die Steuerung des FIT dies als fehlerhafte Messung. Die eingespritzte Kraftstoffmenge wurde für alle Messungen so eingestellt, dass sowohl bei Diesel-, wie auch bei Rapsölmessungen der Spitzenruck bei der Verbrennung ca. 8 bar betrug.

5.5.9 Weitere Messparameter

In Tabelle 1 werden die wichtigsten Parameter für die Einstellung der Messbedingungen zusammengefasst und erläutert. Messparameter, deren Bedeutung vom Hersteller nicht dokumentiert werden, beziehungsweise deren Auswirkungen nicht aus dem Zusammenhang der Regelung des Messgeräts ersichtlich sind, wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Beschreibung der wichtigsten Messparameter für die Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester

Parameter	Beschreibung
chamber press. ref.	Voreinstellung Brennkammerdruck
chamber temp. ref.	Voreinstellung Brennkammertemperatur
fuel temp. ref.	Voreinstellung Kraftstofftemperatur
chamber reg. Ref.	Voreinstellung Brennkammerwandtemperatur
max. chamber press.	maximaler Brennkammerdruck
max. chamber temp.	maximale Brennkammertemperatur
max. fuel temp.	maximale Kraftstofftemperatur
chamber start press.	Anfangsfülldruck der Brennkammer
filling press. limit	Obergrenze Brennkammerfülldruck
chamber press. hyst.	zulässige Abweichung des Brennkammerdrucks
emptying press. limit	verbleibender Restdruck in der Brennkammer
max. # injections	Anzahl der Einspritzungen
wall regulation limit	erlaubte Schwankung der Brennkammerwandtemperatur
chamber trajektor gain	Regelungsparameter für die Brennkammertemperatur
Einspritzdüse	Düsenlochdurchmesser der verwendeten Einspritzdüse

Aus den möglichen Einflüssen auf die Güte der Cetanzahlmessung mit dem FIT ergeben sich folgende untersuchte Varianten zur Optimierung der Cetanzahlmessung mit dem FIT für Dieselkraftstoff. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Messparameter der Varianten 1 bis 18 dargestellt. Die abgeänderten Parameter wurden in der Tabelle grau unterlegt. Die jeweils beste Einstellung wurde für die folgenden Varianten übernommen.

Variante 1 entspricht den Vorgaben des Herstellers (Standardsettings) für die Cetanzahlmessung von Dieselkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester vor der Modifizierung; Variante 13 entspricht den Standardsettings des FIT-1.

Tabelle 2: Parameter der Varianten 1 bis 18 für die Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester

Varianten	Parameter														
	chamber press. ref. [bar]	chamber temp. ref. [°C]	fuel temp. ref. [°C]	chamber reg. Ref. [°C]	max. chamber press. [bar]	max. chamber temp. [°C]	max. fuel temp. [°C]	chamber start press. [bar]	filling press. limit [bar]	chamber press. hyst. [bar]	emptying press. limit [bar]	max. # injections	wall regulation limit [°C]	chamber trajektor gain	Ø Einspritzdüse [mm]
1	20	500	50	525	45	590	100	16	18	0,6	1,0	20	1,0	---	0,25
2	20	500	50	525	45	590	100	16	18	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
3	20	500	50	525	45	590	100	16	18	0,1	0,1	20	1,0	---	0,25
4	20	500	50	525	45	590	100	16	18	0,3	0,1	20	1,0	---	0,25
5	20	500	50	525	45	590	100	15	18	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
6	20	500	50	525	45	590	100	16	18	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
7	20	500	50	525	45	590	100	15	19	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
8	20	500	50	525	45	590	100	16	19	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
9	20	475	50	500	45	590	100	15	18	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
10	30	500	50	525	45	590	100	25	27	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
11	20	525	50	550	45	590	100	15	18	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
12	30	525	50	550	45	590	100	25	27	0,3	0,3	20	1,0	---	0,25
13	20	500	50	---	---	---	100	16	---	0,6	1,6	20	---	10	0,25
14	20	525	50	---	---	---	100	15	---	0,3	0,3	20	---	10	0,25
15	20	500	50	---	---	---	100	16	---	0,3	0,3	20	---	10	0,35
16	25	500	50	---	---	---	100	16	---	0,3	0,3	20	---	10	0,35
17	20	525	50	---	---	---	100	15	---	0,3	0,3	20	---	10	0,35
18	25	525	50	---	---	---	100	15	---	0,3	0,3	20	---	10	0,35

5.6 Statistische Auswertung der Einzelmessungen des Zündverzugs

Zu Anfang der Versuchsdurchführung soll die Eignung eines eigens zur Eliminierung möglicher Ausreißer entwickelten Statistikprogramms (im weiteren LOK Programm genannt) getestet werden. Mit Hilfe dieses Programms kann eine eventuelle Messungenauigkeit, beziehungsweise eine Streuung der gemessenen Zündverzüge im Vorfeld erkannt und dem eigentlichen Zündverzug angeglichen werden.

Hierfür werden die mit dem Fuel Ignition Tester ermittelten Cetanzahlen und Zündverzugszeiten der original Messwerte (im Folgenden mit ORG bezeichnet), mit den Messwerten der manuellen Ausreißereliminierung nach Herstellerempfehlung (im Folgenden mit MAN bezeichnet) und den statistisch korrigierten Messwerten der Zündverzugszeiten (im Folgenden mit LOK bezeichnet) verglichen und auf die Auswirkung hinsichtlich der Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit der Ergebnisse untersucht.

Im Folgenden wird näher auf das Funktionsprinzip des verwendeten Statistikprogramms eingegangen. Das LOK-Programm wurde von M. Bachmaier speziell für das Forschungsvorhaben entwickelt.

Die folgenden Unterkapitel wurden unter Zugrundelegung der Abhandlung „A confidence interval without any influence of outliers“ von M. Bachmaier (2003) [3] verfasst.

5.6.1 Die Idee des M-Schätzers

Wie bereits in Kapitel 3.3.8 erwähnt, unterliegen Zündort und Zündverzug immer geringen zyklischen Schwankungen, die aus stochastischen Unregelmäßigkeiten im Einspritzstrahl herrühren [21]. Aber auch Schwankungen im Druck- oder Temperaturverlauf der Brennkammer können den gemessenen Zündverzug beeinflussen. Im ungünstigsten Fall können diese Unregelmäßigkeiten das Messergebnis verfälschen. Diese sogenannten Ausreißer bei den gemessenen Zündverzügen können sowohl ober- wie auch unterhalb des eigentlichen Messwertes liegen.

Bei einer angenommenen symmetrischen Verteilung der tatsächlichen Zündverzüge um einen nicht bekannten Lokationsparameter μ muss dieser geschätzt werden. Die Verwendung der Lokationsschätzung anstelle der Mittelwertbildung, würde diese Ausreißer bei der Berechnung des Gesamtergebnisses ausschließen, so dass diese keinen verfälschenden Einfluss mehr hätten. Zusätzlich sollte ein 95%-Vertrauensintervall für μ , welches zur Untermauerung der Genauigkeit der Schätzung dient, ebenfalls von solchen „fehlerhaften“ Messwerten unberührt bleiben.

Herkömmliche Methoden wie eine Entfernung aller Werte, die mehr als drei oder vier Standardabweichungen vom Mittelwert abweichen, eignen sich in diesem Falle nicht, da die Ausreißer bereits die Standardabweichung beeinflusst haben.

Der Hersteller des Fuel Ignition Testers empfiehlt deshalb einen Art getrimmten Mittelwert, bei dem die ersten beiden Messwerte sowie der jeweilige Maximal- als auch Minimalwert nicht in die Cetanzahlbestimmung einfließen. Diese Methode hat den Nachteil, dass sie nicht berücksichtigt, ob es sich bei solchen Werten tatsächlich um Ausreißer handelt. Wenn zum Beispiel von 20 gemessenen Zündverzügen drei viel zu groß ausfallen, entfernt diese Vorgehensweise den kleinsten Wert, obwohl er richtig ist und behält im Gegenzug zwei der drei Ausreißer für die Bestimmung der Cetanzahl des gemessenen Kraftstoffs.

Ein Schätzer, der diese Nachteile nicht besitzt ist der sogenannte M-Schätzer. Um die Idee des M-Schätzers zu verstehen, empfiehlt es sich, den Mittelwert als den Wert zu sehen, von dem die Summe der Abweichungen gleich null ist ($\sum(x_i - \bar{x}) = 0$), oder von dem die Summe der Abweichungen nach unten genauso groß ist wie die Summe der Abweichungen nach oben. Folgendes Zahlenbeispiel soll dies verdeutlichen. Der Mittelwert der Zahlen 2, 2 und 5 ist demnach 3; denn

es gilt für die Abweichungen von 3, dass $-1 -1 +2 = 0$ ist. Die Zahlen 1, 2, 3, 4, 100 haben den Mittelwert $\bar{x} = 22$; denn es gilt für die Summe der Abweichungen: $-21 - 20 - 19 - 18 + 78 = 0$. Der Ausreißer „100“ führt zu den betragsmäßig großen Abweichungen und schraubt somit den Mittelwert nach oben. Die Idee des Huber-Schätzers $\hat{\mu}$ ist es nun, die absoluten Abweichungen zu beschränken [17], zum Beispiel durch die Schranke 2. Nicht mehr die Summe $\sum (x_i - \bar{x})$ soll gleich 0 sein, sondern die Summe ihrer ψ -Werte: $\sum \psi(x_i - \bar{x}) = 0$, wobei $\psi(x) = x$ nur für $x \in [-2,2]$ gilt, andernfalls ist $\psi(x) = 2$ beziehungsweise $\psi(x) = -2$. Auf diese Weise wird der Einfluss von Ausreißern durch die Schranke 2 beschränkt. Für die Zahlen 1,2,3,4,100, deren Mittelwert 22 ist, ergibt sich der Wert 3; denn die Summe der ψ der Abweichungen dieser Zahlen von 3 ist

$$\begin{aligned} & \psi(1-3) + \psi(2-3) + \psi(3-3) + \psi(4-3) + \psi(100-3) = \\ & \psi(-2) + \psi(-1) + \psi(0) + \psi(1) + \psi(97) = -2 - 1 + 0 + 1 + 2 = 0. \end{aligned}$$

Auf diese Weise wird der Einfluss des Ausreißers 100 sehr stark reduziert. Der Wert 5 anstelle 100 hätte hier den gleichen Einfluss. Für eine wiederabsteigende ψ -Funktion bis auf 0, bei besonders großen absoluten Abweichungen wie -97, ergibt sich die Hampel-Schätzung 2,5, da für die Abweichungen von 2,5 gilt:

$$\psi(-1,5) + \psi(-0,5) + \psi(0,5) + \psi(1,5) + \psi(97,5) = -1,5 - 0,5 + 0,5 + 1,5 + 0 = 0.$$

Der größte Wert 100 hätte hier also überhaupt keinen Einfluss mehr, während der kleinste Wert 1, der kein Ausreißer zu sein scheint, voll berücksichtigt wird.

5.6.2 M-Schätzer für Lokations- und Skalensparameter

Eine wiederabsteigende ψ -Funktion, die den Einfluss von Ausreißern minimiert, besteht aus Geraden- und Parabelstücken, ist differenzierbar und ist für $|x| \geq 3,3$ wieder beim Wert 0 angekommen. Die ψ -Funktion wird aber in der Regel auf standardisierte Daten angewandt, das heißt man löst nicht $\sum \psi(x_i - \hat{\mu}) = 0$, sondern:

$$\sum_{i=1}^n \psi\left(\frac{x_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) = 0 \quad (1)$$

Dabei kann die Skalenschätzung $\hat{\sigma}$ ebenfalls durch eine M-Schätzung bestimmt werden. Die Skalen-M-Schätzung ist bei bekannten $\hat{\mu}$ durch das Lösen von

$$\sum_{i=1}^n \chi\left(\frac{x_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma} \sqrt{(n-1)/n}}\right) = 0 \quad (2)$$

gegeben. Für $\chi(x) = x^2 - 1$ und $\hat{\mu} = \bar{x}$ ergibt die Standardabweichung eine Skalenschätzung. Um aber auch bei der Skalenschätzung Ausreißern Einhalt zu gebieten, muss anstelle dieser klassischen Funktion eine beschränkte Funktion verwendet werden. In der Praxis werden Lokations- und Skalenschätzung gleichzeitig bestimmt, indem das aus den Gleichungen (1) und (2) bestehen-

de Gleichungssystem simultan gelöst wird. Ein Lösungsverfahren wurde von HUBER (1977) [18] beschrieben.

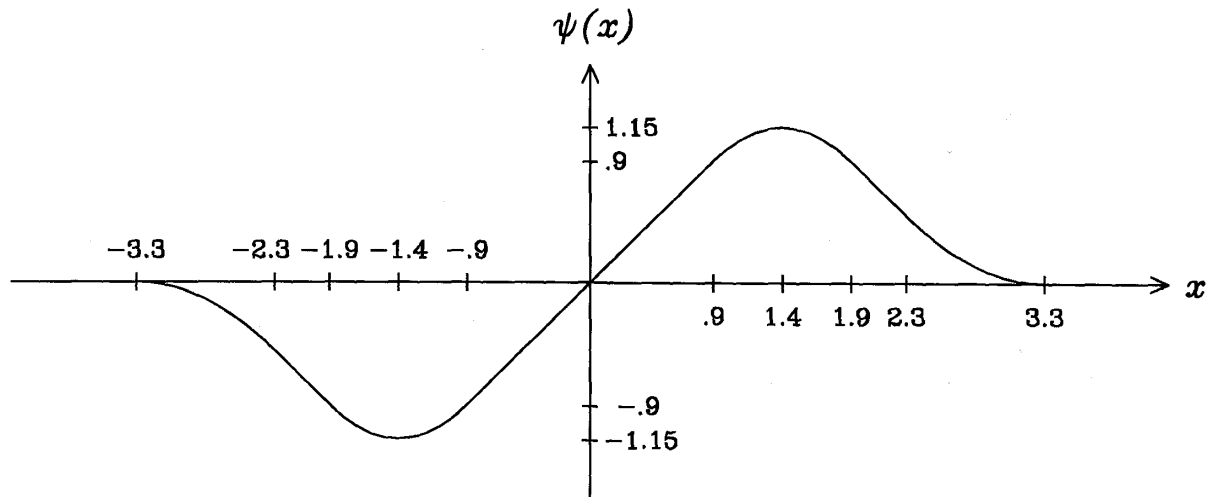
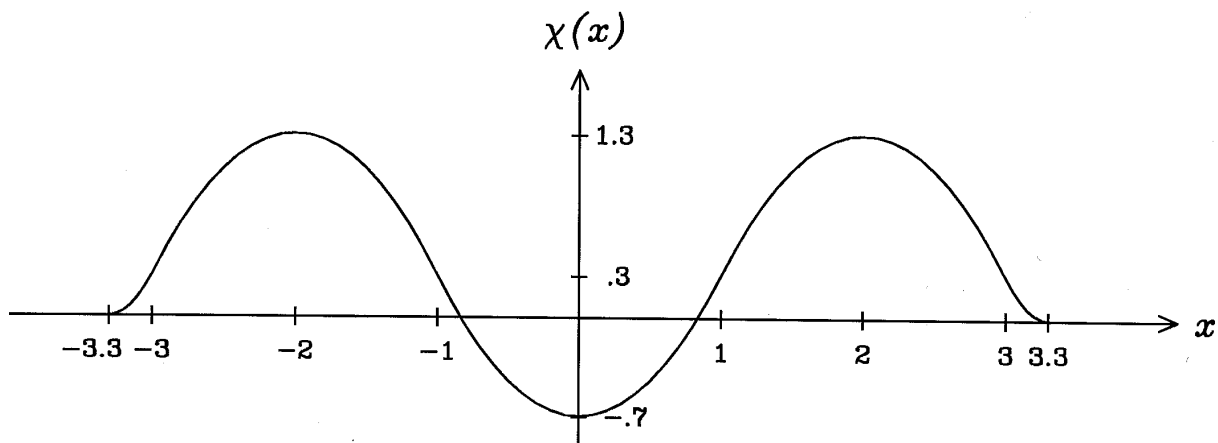
5.6.3 Die Implementation der Lokations-M-Schätzung und des Vertrauensintervalls im LOK Programm

Die Wahl wiederabsteigender M-Schätzer für Lokations- und Skalenparameter genügt jedoch nicht, um Konfidenzintervalle für den Lokationsparameter μ zu konstruieren, auf die Ausreißer überhaupt keinen Einfluss mehr haben. Solche Vertrauensintervalle hängen in der Regel vom Stichprobenumfang n ab, der durch Ausreißer erhöht wird. Aus diesem Grund muss n durch einen Parameter ersetzt werden, der von Ausreißern nicht mehr beeinflusst wird. Da aber ψ stetig wiederabsteigt, ist es nicht angebracht, den Stichprobenumfang n durch ein \tilde{n} zu ersetzen, bei dem alle Daten weggelassen werden, deren Betrag nach der Standardisierung größer oder gleich 3,3 ist, weil demzufolge ihr ψ -Wert sowie ihr χ -Wert gleich 0 ist. Aufgrund der Stetigkeit von ψ empfiehlt es sich, n durch ein \tilde{n} zu ersetzen, welches von jedem Datum nur den Anteil des Einflusses zählt, welchen es aufgrund der gewählten ψ -Funktion im Verhältnis zum Einfluss des Mittelwertes hat. Im Programm LOK wird \tilde{n} Wertungs- n genannt. Definiert ist dieses \tilde{n} in der letzten Gleichung des folgenden Gleichungssystems. Dieses muss gelöst werden, um Lokations- und Skalen-schätzung unter Verwendung von \tilde{n} statt n als simultane M-Schätzer für die entsprechenden Parameter μ und σ zu erhalten.

$$\sum \frac{\psi\left(\frac{x_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)}{\frac{x_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}} = \tilde{n}$$

Das Iterationsverfahren zur Lösung dieses Gleichungssystems, welches auch im LOK Programm verwendet wird, ist in BACHMAIER (2003) [3] beschrieben.

Die verwendeten Funktionen ψ und χ sind im Folgenden dargestellt. Sie bestehen aus Parabel- und Geradenstücken, sind differenzierbar und erreichen jeweils für $|x| \geq 3,3$ wieder den Wert 0.

Abbildung 6: ψ - FunktionAbbildung 7: χ - Funktion

Nach HUBER (1973) [17] ergibt sich die relative asymptotische Varianz a_H des Lokations-M-Schätzers zu

$$a_H = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \operatorname{Var}(\hat{\mu}) / \sigma^2 = E([\psi(e_i)]^2) / [E(\psi'(e_i))]^2 \quad \text{wobei } e_i = (x_i - \mu) / \sigma.$$

Allerdings sind die notwendigen Voraussetzungen dafür bei wiederabsteigenden M-Schätzern nicht gegeben. Dennoch erweist sich diese Formel empirisch meist als richtig. Gewöhnlich wird nun dieses a_H durch ein \hat{a}_H konsistent geschätzt. Es stellt sich aber heraus, dass für alle t -Verteilungen mit $\nu \geq 2$ Freiheitsgraden $\tilde{a}_H = a_H \cdot E(\tilde{n}/n)$ mit Werten zwischen 1,15 und 1,14 nahezu konstant ist. Somit ersetzen wir in der üblichen Formel für Vertrauensintervalle mit M-Schätzern im Wesentlichen nur \hat{a}_H/n durch \tilde{a}_H/\tilde{n} ; denn \tilde{a}_H/\tilde{n} mit einem nahezu fixen \tilde{a}_H und variablem \tilde{n} variiert bedeutend weniger als \hat{a}_H/n , wo \hat{a}_H konsistenter Schätzer für a_H ist und n fix ist. Das resultierende Konfidenzintervall

$$\check{C}(x) = \left[\hat{\mu} - t_{v;1-\alpha/2} \hat{\sigma} \sqrt{\tilde{a}_h/\tilde{n}}, \hat{\mu} + t_{v;1-\alpha/2} \hat{\sigma} \sqrt{\tilde{a}_h/\tilde{n}} \right] \text{ mit } v = \tilde{n} / \tilde{a}_h - 1$$

hängt dann von starken Ausreißern überhaupt nicht mehr ab. Es wurde bereits mittels Monte-Carlo-Simulationen eine nur von $r:=1/\tilde{n}$ abhängige Funktion für \tilde{a}_H entwickelt ($\tilde{a}_H \rightarrow 1,1426$ für $\tilde{n} \rightarrow \infty$, das heißt $r \rightarrow 0$), so dass das 95 %-Konfidenzintervall für symmetrische Verteilungen mit verschiedenster Kurtosis in Bezug auf die tatsächliche Überdeckungswahrscheinlichkeit von μ auch für kleine Stichproben ($n \geq 4$) sehr genau ist. Abbildung 8 zeigt die graphische Darstellung dieser Funktion.

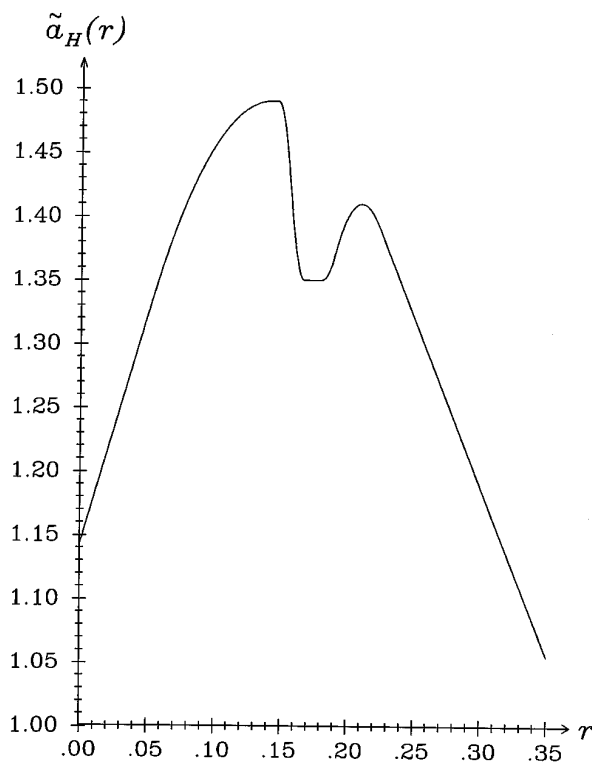


Abbildung 8: Funktion für \tilde{a}_H

Die formelmäßige Definition dieser Funktion für \tilde{a}_H sowie auch die für die ψ - und χ -Funktion wurde von BACHMAIER (2003) [3] dokumentiert.

5.7 Einlesen der Referenzkurven

Durch eine Kalibrierung des Fuel Igniton Testers mit Referenzkraftstoffen bekannter Cetanzahl ist es möglich, auf die sogenannte FIT-Cetanzahl (FIT CN) zu schließen, die mit der in einem Prüfmotor zu erwartenden Cetanzahl vergleichbar ist. Die bei der Cetanzahlbestimmung mit dem FIT verwendeten Referenzkurven werden gemäß Herstellerangaben mit Dieselkraftstoffgemischen abgestufter Cetanzahl aus den ASTM-Referenzkraftstoffen T 22 (CN = 74,8) und U 15 (CN = 18,7) des Herstellers Chevron Phillips Chemicals ermittelt. Zu diesem Zweck ist in der Steuerungssoftware des FIT ein eigener Menüpunkt Referenzmessung (reference test) vorgesehen. Die

für den jeweiligen Referenzkraftstoff gemessene mittlere Zündverzugszeit dient dem Erstellen der jeweiligen Referenzkurve. Bei der Erstellung der Referenzkurven für die nachfolgenden Varianten betrug die Abstufung der verwendeten Referenzkraftstoffe maximal 2 CN. In jeder Referenzkurve wurde das gesamte Cetanzahlspektrum von 35 bis 64 abgedeckt. Die benötigte Kraftstoffmenge für den jeweiligen Referenzkraftstoff wurde mit einer Dispensette abgemessen.

Insgesamt wurden jeweils 80 ml eines Kraftstoffgemisches für die Referenzmessung hergestellt, um mit dem überschüssigen Kraftstoff die Einspritzeinheit des Fuel Ignition Testers vorab zu spülen und etwaige Kraftstoffreste aus der vorherigen Referenzmessung zu entfernen.

Für das Einlesen der Referenzkurven wurde das LOK-Statistikprogramm eingesetzt.

5.8 Verwendete Kraftstoffe

Für die Messungen mit dem Fuel Ignition Tester standen folgende Kraftstoffe zur Verfügung:

- Zwei ASTM-Referenzkraftstoffe, T-22 (CN = 74,8) und U-15 (CN = 18,7) des Herstellers Chevron Phillips Chemical zum Erstellen der Referenzkurven
- Dieselmotorkraftstoff mit bekannter Cetanzahl (CN = 50), aus einem Ringversuch zur Cetanzahlmessung mit dem CFR- und BASF-Prüfmotor
- Handelsüblicher Dieselmotorkraftstoff, mit einer gemessenen Cetanzahl von 52,6 nach DIN EN ISO 5165 beziehungsweise 53,6 nach DIN 51773
- Zwei Rapsölmotorkraftstoffe (im weiteren als Rapsölmotorkraftstoff A und B bezeichnet), gemäß RK-Qualitätsstandard [23]
- 32 Rapsölmotorkraftstoffproben von unterschiedlichen Rapsölmotorkraftstoffproduzenten

5.9 Cetanzahlmessung mit dem FIT

Jede zu untersuchende Kraftstoffprobe wird mit einer Einwegspritze abgemessen, durch einen Spritzenaufsatzfilter mit Cellulose-Acetat-Membran und einer mittleren Porosität von 5,0 μm gereinigt und direkt in den Kraftstoffbehälter des FIT eingefüllt.

Bei der Messung von Rapsölmotorkraftstoff wird vor jeder Messung die Funktion des Fuel Ignition Testers mit Dieselmotorkraftstoff bekannter Cetanzahl überprüft. Nach der Cetanzahlmessung der zu untersuchenden Rapsölmotorkraftstoffproben, wird nochmals derselbe Dieselmotorkraftstoff auf seine Zündwilligkeit hin untersucht und das Ergebnis mit der Vorabmessung verglichen. Erfüllen die gemessenen Cetanzahlen nicht die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773, so wird die Messung verworfen.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Cetanzahlmessung von Dieselkraftstoff mit dem FIT

6.1.1 Überprüfung des LOK Statistik Programms zur Ausreißereliminierung

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse von fünf FIT-Cetanzahlmessungen mit Dieselkraftstoff bekannter Cetanzahl (CN = 50 im Prüfmotor), aufgeschlüsselt nach den Messergebnissen ohne Ausreißerkorrektur (ORG Cetanzahlen), den korrigierten Messergebnissen laut Herstellerempfehlung (MAN Cetanzahlen) sowie den statistisch korrigierten Ergebnissen (LOK Cetanzahlen). Die Einstellungen am Messgerät entsprachen den Vorgaben des Herstellers (Variante 1).

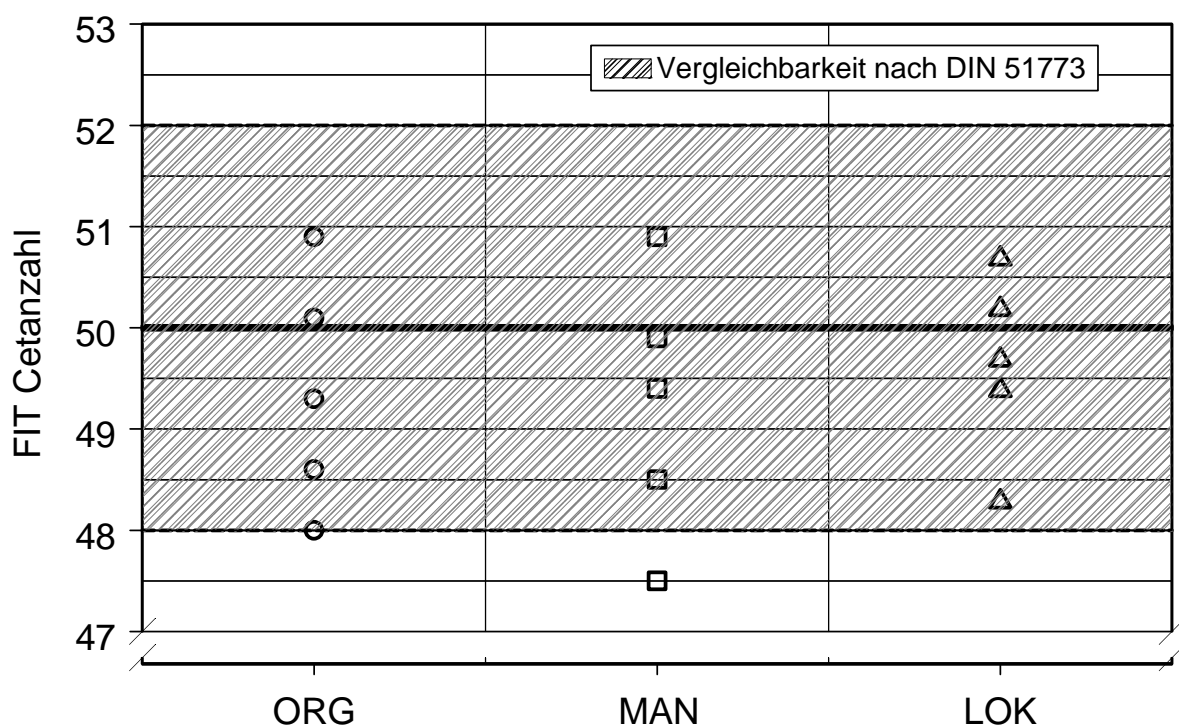


Abbildung 9: ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 5 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieselkraftstoff (CN = 50 im Prüfmotor)

Der schraffierte Bereich markiert die Grenzen der in DIN 51773 verankerten Vergleichbarkeit zweier Prüfmotoren, um einen Vergleich der FIT-Cetanzahlmessung mit dem bestehenden Prüfverfahren zu ermöglichen. Diese Darstellungsweise wird auch bei den nachfolgenden Abbildungen beibehalten.

Sowohl die ORG- als auch die LOK-Cetanzahlen bewegen sich innerhalb dieses Bereichs. Die ermittelten MAN-Cetanzahlen können die Vorgaben für die Vergleichbarkeit nach DIN 51773 nicht einhalten. Durch die getrimmte Mittelwertsbestimmung laut Herstellerempfehlung wurden offensichtlich zum Teil messtechnisch relevante Einzelmessungen fälschlicherweise aus der Berechnung herausgenommen.

Die in der Norm festgelegte Wiederholbarkeit konnten die ermittelten ORG-, MAN- und auch LOK-Cetanzahlen nicht einhalten.

Aus Tabelle 3 können die Mittelwerte, die Spannweiten sowie die Standardabweichungen der ermittelten Cetanzahlen entnommen werden.

Tabelle 3: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von fünf Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen

\bar{x} (FIT-CN)			R (FIT-CN)			s (FIT-CN)		
ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK
49,4	49,2	49,7	2,9	3,4	2,4	1,16	1,30	0,91

Die getrimmte Mittelwertsbestimmung laut Herstellerempfehlung führt beim Vorhandensein mehrerer Ausreißer zu keiner qualitativen Verbesserung der Cetanzahlmessung im Vergleich zu den nicht korrigierten Cetanzahlen (vergleiche 5.6.1). Aufgrund der geringeren Spannweite sowie der niedrigeren Standardabweichung der LOK Cetanzahlen weisen die statistisch korrigierten Werte die geringste Streuung auf.

Die Möglichkeit der Ausreißerkorrektur durch die getrimmte Mittelwertsbestimmung sowie durch das LOK-Programm werden auch bei den folgenden Ergebnisauswertungen mit berücksichtigt.

6.1.2 Anzahl der Einzelmessungen

Zum Festlegen der benötigten Anzahl an Einspritzungen für eine Cetanzahlbestimmung mit dem FIT wurden Messungen mit je 10, 15 und 20 Einzelmessungen (Einspritzungen) mit Dieselmotorkraftstoff (CN = 53,6 im Prüfmotor) durchgeführt. Da in Vorversuchen des öfteren Fehlmessungen unter Verwendung der Standardeinstellung auftraten, wurden für die in Abbildung 10 dargestellten Ergebnisse die Einstellung gemäß Variante 2 verwendet.

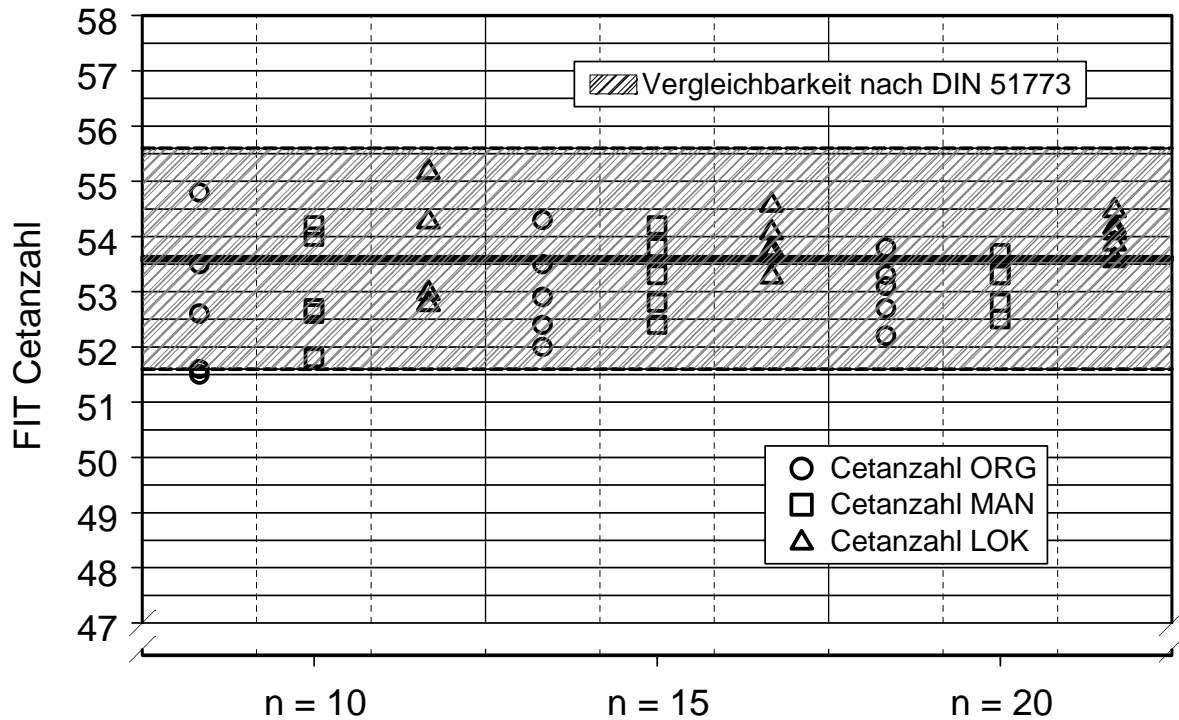


Abbildung 10: ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 5 Messungen mit Dieselkraftstoff ($CN = 53,6$ im Prüfmotor) bei 10, 15 und 20 Einspritzungen

Mit steigender Anzahl an Einzeleinspritzungen verringert sich die Spannweite der Messergebnisse. Es ist außerdem eine Abnahme der Spannweite der MAN- und LOK-Cetanzahlen im Vergleich zu den nicht korrigierten ORG-Cetanzahlen, unabhängig von der Anzahl an Einzelmessungen, zu beobachten. Bis auf die Messungen mit nur zehn Einspritzungen weisen die korrigierten LOK-Cetanzahlen im Vergleich zu ORG und MAN die geringste Spannweite auf.

Die nach DIN 51773 vorgeschriebene Vergleichbarkeit wird nur von den ORG Cetanzahlen bei zehn Einzelmessungen nicht eingehalten.

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen sowie die Mittelwerte der gemessenen Zündverzögerungen dargestellt.

Tabelle 4: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für 10, 15 und 20 Einzelmessungen von 5 Cetanzahlmessungen

Anzahl der Einspritzungen	\bar{x} (FIT-CN)			\bar{x} (ZV) [ms]			R (FIT-CN)			s (FIT-CN)		
	ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK
n = 10	52,8	53,3	53,6	7,11	7,07	7,06	3,3	2,4	2,4	1,38	1,01	1,08
n = 15	53,0	53,1	53,9	7,09	7,08	7,04	2,3	1,8	1,3	0,91	0,73	0,48
n = 20	53,0	53,3	54,1	7,09	7,07	7,02	1,6	1,2	0,9	0,61	0,47	0,34

Das Cetanzahlniveau der Mittelwerte aus den verschiedenen Cetanzahlmessungen bewegt sich um die im Prüfmotor ermittelte Cetanzahl des verwendeten Dieselkraftstoffs (CN = 53,6).

Durch die getrimmte Mittelwertsbestimmung laut Herstellerempfehlung konnte bei allen vorliegenden Messergebnissen eine qualitative Verbesserung der Cetanzahlmessung im Vergleich zu den nicht korrigierten Cetanzahlen erreicht werden. Wird die Anzahl der Einzelmessungen jedoch auf 15 beziehungsweise 20 erhöht, weisen die statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen die geringsten Spannweiten sowie die niedrigsten Standardabweichungen verglichen mit den anderen Messergebnissen auf.

Die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773 (R £ 1,0) kann nur von den statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen bei 20 Einzeleinspritzungen eingehalten werden (vergleiche Tabelle 4).

Eine Verringerung der Anzahl an Einzeleinspritzungen verkürzt zwar die Dauer einer Messung, verschlechtert jedoch die Qualität der Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester. Für die weiteren Untersuchungen mit dem Fuel Ignition Tester wurde die Anzahl an Einzelmessungen auf 20 eingestellt.

6.1.3 Anpassung der allgemeinen Regelparameter

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Cetanzahlmessungen mit den Einstellungen der Varianten 1 bis 4 dargestellt. Die Einstellung der einzelnen Varianten kann aus Tabelle 2 entnommen werden.

Der vorgegebene Hysteresewert der Variante 3 konnte bei den Messungen nicht dauerhaft eingehalten werden. Aus diesem Grund wurden die Messungen mit den Einstellungen der Variante 3 nicht ausgewertet.

In Abbildung 11 werden die Messwerte ohne Ausreißereliminierung (ORG-Cetanzahlen) den Ergebnissen der manuellen Ausreißereliminierung nach Herstellerempfehlung (MAN-Cetanzahl) und den statistisch korrigierten Messwerten (LOK-Cetanzahl) gegenübergestellt.

Alle Messungen wurden mit handelsüblichen Dieselkraftstoff bekannter Cetanzahl (CN 53,6 im Prüfmotor) durchgeführt. Zu jeder Cetanzahlmessung werden die Zündverzugszeiten von 20 Einzeleinspritzungen ausgewertet.

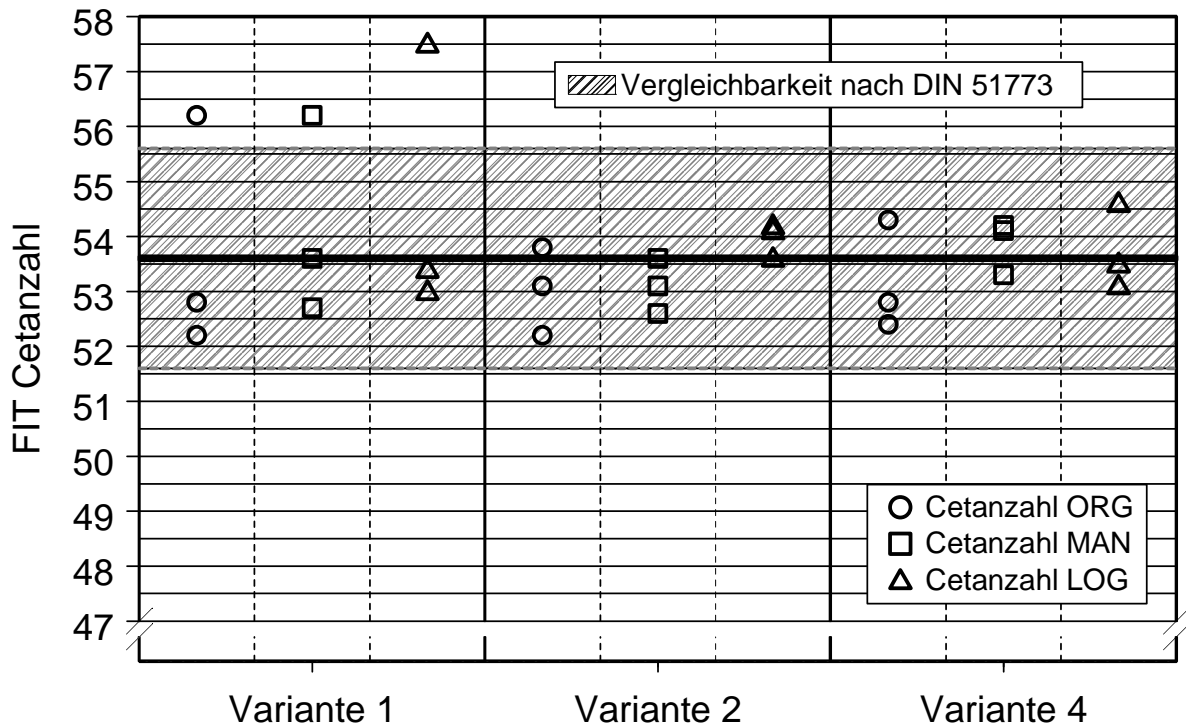


Abbildung 11: ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 3 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieselkraftstoff (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 1, 2 und 4

Die Vorgabe für die Vergleichbarkeit nach DIN 51773 wird lediglich von den Cetanzahlmessungen der Variante 1 nicht eingehalten. Bei allen ermittelten Cetanzahlen aus diesen Messungen liegt ein Messpunkt deutlich über der vorab im Prüfmotor gemessenen Cetanzahl. Eine Verfälschung des Messergebnisses durch Ausreißer kann nahezu ausgeschlossen werden, da das verwendete LOK-Statistikprogramm den Messwert nach höher gewichtet und nicht, wie beim Vorhandensein von Ausreißern zu erwarten, niedriger. Die Ursache dieser Fehlmessung konnte nicht geklärt werden, da weder Abweichungen von den Messbedingungen noch eine Fehlermeldung der Steuerungssoftware vorlag.

Die ermittelten Cetanzahlen mit den Einstellungen der Variante 2 und 4 liegen innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen der Vergleichbarkeit nach DIN 51773. Die Spannweiten der MAN- und LOK-Cetanzahlen liegen bei beiden Varianten unter den Spannweiten der ORG-Cetanzahlen.

In Tabelle 5 sind die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen sowie die Mittelwerte der gemessenen Zündverzüge dargestellt.

Tabelle 5: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Varianten 1, 2 und 4 von 3 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen

Variante:	\bar{x} (FIT-CN)			\bar{x} (ZV) [ms]			R (FIT-CN)			s (FIT-CN)		
	FIT	MAN	LOK	FIT	MAN	LOK	FIT	MAN	LOK	FIT	MAN	LOK
Variante 1	53,7	54,2	54,6	7,01	6,99	6,97	4,0	3,5	4,5	2,16	1,82	2,49
Variante 2	53,0	53,1	54,0	7,06	7,07	7,00	1,6	1,0	0,6	0,80	0,50	0,32
Variante 4	53,2	53,9	53,7	7,06	7,02	7,01	1,9	0,9	1,5	1,00	0,49	0,78

Das Cetanzahlniveau der verschiedenen Messungen bewegt sich wiederum um die im Prüfmotor ermittelte Cetanzahl des verwendeten Dieselmotors CN = 53,6.

Ausgehend von den ermittelten Spannweiten der einzelnen Cetanzahlmessungen erfüllen nur die MAN- und LOK-Cetanzahlen der Variante 2 sowie die MAN-Cetanzahlen der Variante 4 die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773.

Bei der Cetanzahlmessung mit den Einstellungen der Variante 4 hat die statistische Ausreißereliminierung der Zündverzögerungszeiten mit dem LOK-Programm keine merklichen Vorteile.

Aufgrund der geringen Abweichung der statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen der Variante 2 bietet diese eine bessere Ausgangsbasis für weitere Varianten. Für die folgenden Untersuchungen mit dem Fuel Ignition Tester wird der Hysteresewert zur Regelung des Kammerdrucks (chamber press. hyst.) mit 0,3 bar und der verbleibende Restdruck in der Brennkammer (emptying press. limit) auf 0,3 bar festgelegt.

6.1.4 Anpassung der Kammerdruckregulation

Idealerweise sollte ein konstanter Druck in der Brennkammer bei jeder Einzelmessung mit dem FIT vorliegen. Für die folgenden Messungen wurde der Fülldruck des Brennraums (chamber start pressure, filling pressure limit) modifiziert, um Druckschwankungen zu Beginn der Cetanzahlmessung zu minimieren. Die Einstellungen der Varianten 5 bis 8 sind in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei wird der „chamber start pressure“ zwischen 15 und 16 bar und das „filling pressure limit“ zwischen 18 und 19 bar variiert.

Vom Hersteller ist für eine Cetanzahlmessung von Dieselmotors ein „chamber start pressure“ von 16 bar und ein „filling pressure limit“ von 18 bar vorgesehen. Die Ergebnisse aus den Cetanzahlmessungen mit den Einstellungen der Varianten 7 und 8 wurden aufgrund erheblicher Druckschwankungen in der Brennkammer nicht ausgewertet.

Die Ergebnisse der Cetanzahlmessungen der Varianten 5 und 6 sind in Abbildung 12 dargestellt. Alle Messungen wurden mit handelsüblichem Dieselmotors bekannter Cetanzahl (CN = 53,6 im Prüfmotor) durchgeführt.

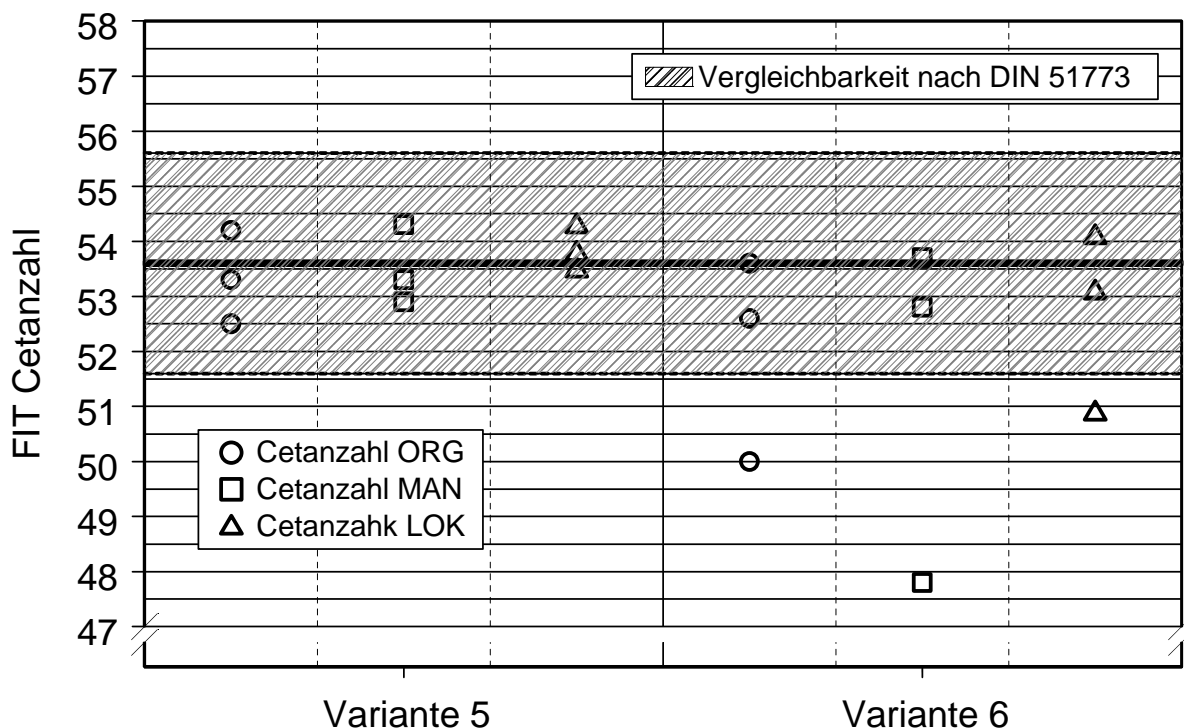


Abbildung 12: ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen von 3 Messungen mit Dieseldieselfkraftstoff (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 5 und 6 à 20 Einzelmessungen

Die in Variante 5 optimierte Befüllung der Brennkammer mit Druckluft ermöglicht eine exaktere Cetanzahlbestimmung. Sowohl ORG-, als auch MAN- und LOK-Cetanzahlen der Variante 5 erfüllen die Vorgaben für die Vergleichbarkeit nach DIN 51773. Bei Variante 6 liegt bei allen Auswertungen ein Messpunkt deutlich außerhalb der Grenzen für die Vergleichbarkeit. Dies ist möglicherweise auf einen unregelmäßigen Druckverlauf in der Brennkammer zu Beginn der Messung zurückzuführen. Bei beiden Varianten weisen die statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen die geringsten Spannweiten auf. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen sowie die Mittelwerte der gemessenen Zündverzüge.

Tabelle 6: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG-, MAN- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzüge für die Varianten 5 und 6 von 3 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen

Variante:	\bar{x} (FIT-CN)			\bar{x} (ZV) [ms]			R (FIT-CN)			s (FIT-CN)		
	ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK	ORG	MAN	LOK
Variante 5	53,3	53,5	53,9	7,05	7,06	7,02	1,7	1,4	0,8	0,85	0,72	0,40
Variante 6	52,1	51,4	52,7	7,16	7,27	7,18	3,6	5,9	3,2	1,86	3,18	1,64

Die qualitative Verbesserung der Cetanzahlmessung durch eine optimierte Befüllung der Brennkammer mit Druckluft zeigt sich auch in den Mittelwerten der gemessenen Cetanzahlen. Die Ergebnisse der Variante 5 liegen sehr nahe an der im Prüfmotor ermittelten Cetanzahl von 53,6.

Ausgehend von den ermittelten Spannweiten der einzelnen Cetanzahlmessungen erfüllen nur die LOK-Cetanzahlen der Variante 5 die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773. Bei der Cetanzahlmessung mit den Einstellungen der Variante 6 führt die manuelle Ausreißereliminierung der Zündverzugszeiten nach Herstellerempfehlung zu einer merklichen Verschlechterung der Cetanzahlbestimmung. Die Spannweite erhöht sich um 2,3 Cetanzahlen verglichen mit den unkorrigierten Messergebnissen und liegt somit weit von der geforderten Spannweite von 1 CN entfernt.

Wie schon in 6.1.1 festgestellt wurde, führt die getrimmte Mittelwertsbestimmung laut Herstellerempfehlung beim Vorhandensein mehrerer Ausreißer zu keiner qualitativen Verbesserung der Cetanzahlmessung im Vergleich zu den nicht korrigierten Cetanzahlen. Aus diesem Grund wird für die folgenden Untersuchungen nur noch das LOK-Statistikprogramm zur Ausreißereliminierung verwendet.

Aufgrund der geringen Abweichung der statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen der Variante 5 bietet diese Einstellung die bessere Ausgangsbasis für weitere Varianten. Für folgende Untersuchungen mit dem Fuel Ignition Tester wird deshalb der „chamber start pressure“ auf 15 bar und der „filling pressure limit“ auf 18 bar festgelegt.

6.1.5 Anpassung der Brennkammertemperatur und des Brennkammerdrucks

Für die Untersuchung des Einflusses der Temperatur in der Brennkammer auf die Wiederholbarkeit der Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester, muss sowohl der Referenzwert für die Temperatur in der Brennkammer (chamber temp. ref.) als auch die jeweilige Wandtemperatur (chamber reg. ref.) angepasst werden, da die Brennkammertemperatur des FIT über die Temperatur der Kammerwand geregelt wird. Hierbei wurde die Empfehlung des Geräteherstellers berücksichtigt, dass die Wandtemperatur 25 °C höher als die angestrebte Temperatur in der Verbrennungskammer einzustellen ist. Die Brennkammertemperatur sollte außerdem 550 °C nicht überschreiten.

Bei einer Erhöhung des Kammerdrucks gilt es zu beachten, dass der anliegende Druck aus der Pressluftflasche am Messgerät um 5 bar höher ist als der eingestellte Referenzdruck. Bei einer Druckerhöhung von 20 auf 30 bar zeigte sich außerdem in Vorversuchen, dass die Kenngrößen für den Fülldruck des Brennraums (chamber start pressure, filling pressure limit) eine wesentlich geringere Auswirkung auf die Regelungsgüte des Messgeräts haben. In den durchgeführten Vorversuchen ergab eine Einstellung von 25 bar „chamber start pressure“ und 27 bar filling pressure limit die stabilsten Messbedingungen.

Die Einstellungen der einzelnen Varianten wurden gemäß den Ergebnissen der vorab durchgeführten Versuchsblöcke angepasst und sind in Tabelle 2 dargestellt.

Für die Vorauswahl der geeigneten Einstellungen des Kammerdrucks und der Kammertemperatur wurde auf das aufwändige Einlesen von Referenzkurven unter Verwendung teurer Referenzkraft-

stoffe verzichtet. Eine Beurteilung der Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit wird anhand der gemessenen Zündverzüge durchgeführt.

Die Ergebnisse der ermittelten Zündverzüge der Varianten 9 bis 12 sind in Abbildung 13 dargestellt. Alle Messungen wurden mit handelsüblichen Dieseldieselkraftstoff bekannter Cetanzahl (CN = 53,6 im Prüfmotor) durchgeführt.

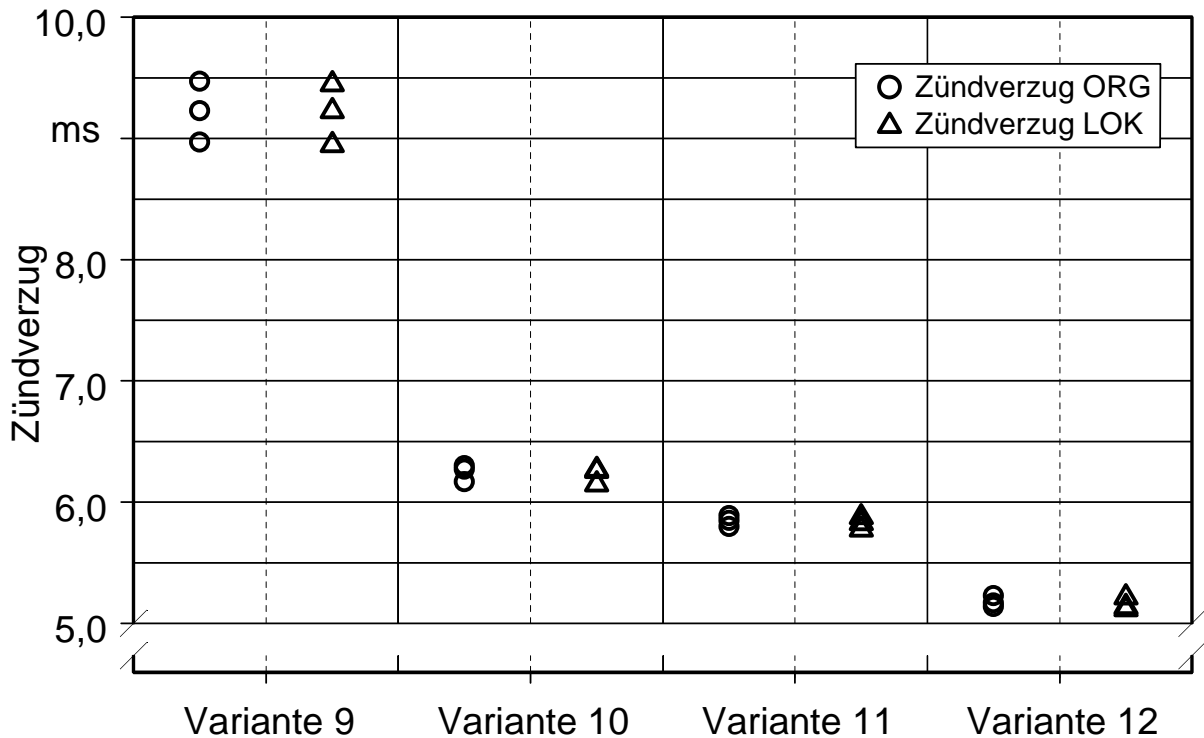


Abbildung 13: ORG- und LOK-Zündverzüge von 3 Messungen mit Dieseldieselkraftstoff (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 9, 10, 11 und 12 à 20 Einzelmessungen

Ein Einfluss der Temperatur- beziehungsweise Druckerhöhung auf die Zündverzugszeiten ist deutlich zu erkennen. Wie aus der Literatur bekannt (vergleiche 3.3.1 und 3.3.2), verringert sich der Zündverzug bei steigenden Temperatur- und Druckverhältnissen im Brennraum.

Die Spannweiten der ermittelten ORG-Zündverzügen verglichen mit den LOK-Zündverzügen sind bei allen Varianten nahezu identisch. Deutlich zu erkennen ist eine Abnahme der Spannweiten der gemessenen Zündverzüge mit steigendem Druck und steigender Temperatur im Brennraum.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG- und LOK-Zündverzüge.

Tabelle 7: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Zündverzögerungen für die Varianten 9, 10, 11 und 12 von 3 Messungen à 20 Einzelmessungen

Variante:	\bar{x} (ZV) [ms]		R (ZV) [ms]		s (ZV)	
	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK
Variante 9	9,22	9,22	0,50	0,50	0,25	0,25
Variante 10	6,25	6,24	0,13	0,12	0,07	0,07
Variante 11	5,15	5,14	0,03	0,02	0,02	0,01
Variante 12	5,85	5,84	0,09	0,10	0,05	0,05

Die Streuung der Messpunkte der Variante 11 ist mit einer Spannweite von 0,02 ms bei den LOK Zündverzögerungen am geringsten. Somit kann bei einer Brennkammertemperatur von 525 °C und einem Brennkammerdruck von 20 bar die beste Wiederholbarkeit erwartet werden.

Zusammenfassend sind in Tabelle 8 die Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen für alle untersuchten Varianten dargestellt.

Tabelle 8: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Zündverzögerungen für die Varianten 1 bis 12

Variante:	\bar{x} (ZV) [ms]		R (ZV) [ms]		s (ZV)	
	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK
Variante 1	7,01	7,01	0,34	0,32	0,18	0,17
Variante 2	7,06	7,03	0,12	0,06	0,07	0,03
Variante 4	7,06	7,06	0,16	0,15	0,09	0,08
Variante 5	7,05	7,04	0,12	0,08	0,06	0,04
Variante 6	7,16	7,16	0,31	0,31	0,16	0,16
Variante 9	9,22	9,22	0,50	0,50	0,25	0,25
Variante 10	6,25	6,24	0,13	0,12	0,07	0,07
Variante 11	5,15	5,14	0,03	0,02	0,02	0,01
Variante 12	5,85	5,84	0,09	0,10	0,05	0,05

Auch in der Gesamtübersicht ist die Streuung der Messpunkte der Variante 11 ausgehend von der Spannweite, sowohl für die nicht korrigierten ORG-Messergebnisse als auch für die statistisch korrigierten LOK-Zündverzögerungen am geringsten.

Somit bietet Variante 11 die beste Ausgangsbasis für weitere Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester. Für die folgenden Untersuchungen wird deshalb die Brennkammertemperatur auf 525 °C und der Brennkammerdruck auf 20 bar für eine weitere Optimierung festgelegt.

6.2 Cetanzahlbestimmung mit dem modifizierten FIT

6.2.1 Vergleich der Standardeinstellung des FIT mit den optimierten Messgeräteeinstellungen

Nach der Überholung und Wartung des Messgeräts durch den Gerätehersteller wurde die aktualisierte Standardeinstellung für die Cetanzahlbestimmung von Dieseldieselkraftstoff, gegen die modifizierten Einstellungen der Versuche mit dem alten Fuel Ignition Testers (Variante 11) getestet. In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der Cetanzahlmessungen der Varianten 13 und 14 dargestellt. Variante 13 entspricht den Vorgaben des Herstellers für eine Cetanzahlmessung von Dieseldieselkraftstoff.

Da durch den Austausch einiger Komponenten eine andere Steuerungssoftware bei der Cetanzahlmessung mit dem FIT-1 verwendet wird, ist die Änderung des Messparameter „filling pressure limit“ nicht mehr möglich. Die Übertragung der Einstellungen der Variante 11 konnte lediglich für die noch veränderbaren Parameter vorgenommen werden (siehe Tabelle 2, Seite 42).

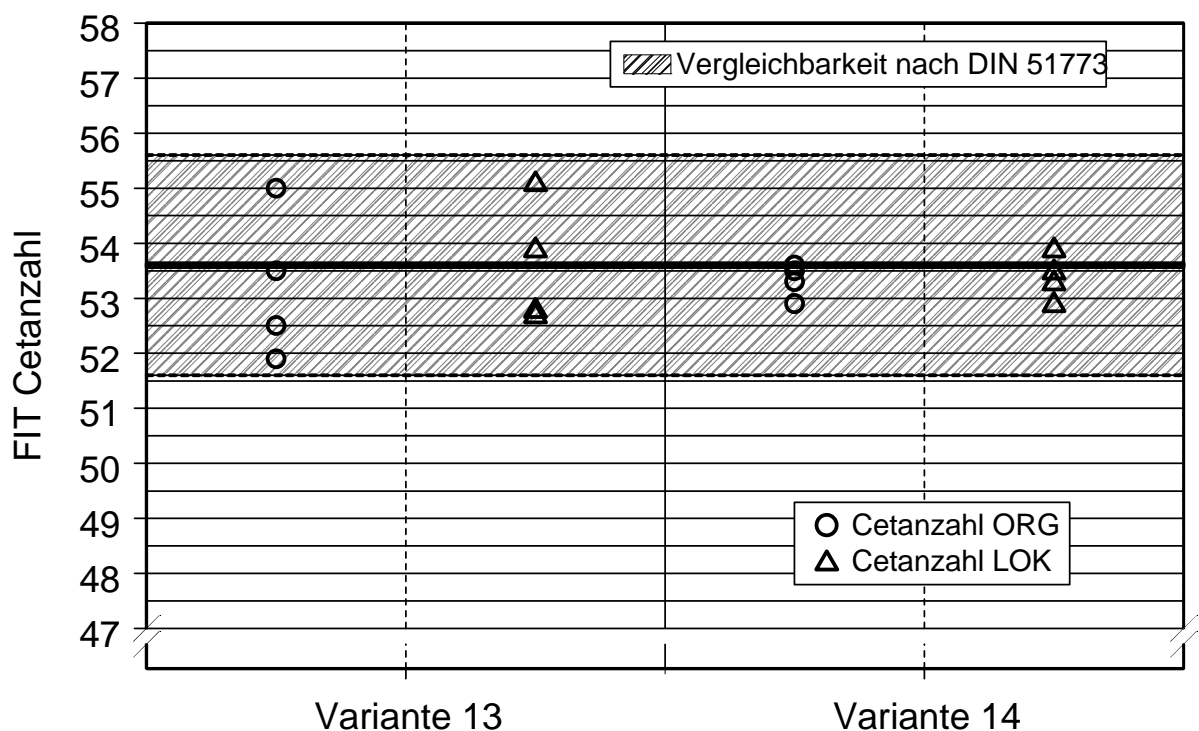


Abbildung 14: ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieseldieselkraftstoff (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 13 und 14

Die ORG- und LOK-Cetanzahlen beider Varianten bewegen sich innerhalb der Grenzen für die Vergleichbarkeit nach DIN 51773. Mit den geänderten Messgeräteeinstellungen ist auch mit dem FIT-1 eine exaktere Cetanzahlmessung möglich. Die ermittelten FIT-Cetanzahlen der Variante 14 weisen deutlich geringere Spannweiten im Vergleich zu den Ergebnissen mit den Einstellungen der Variante 13 auf. Eine Verbesserung der Messgüte durch die Verwendung des LOK-

Statistikprogramms kann nur bei Variante 13 erzielt werden. In Tabelle 9 sind die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG- und LOK-Cetanzahlen sowie die Mittelwerte der gemessenen Zündverzüge dargestellt.

Tabelle 9: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzüge für die Varianten 13 und 14 von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen

Variante	\bar{x} (FIT-CN)		\bar{x} (ZV)		R (FIT-CN)		s (FIT-CN)	
	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK
Variante 13	53,2	53,6	6,21	6,17	3,1	2,4	1,35	1,12
Variante 14	53,3	53,4	5,87	5,86	0,7	1,0	0,31	0,42

Die Mittelwerte der verschiedenen Cetanzahlmessungen bewegen sich auf demselben Cetanzahl-niveau wie die im Prüfmotor ermittelte Cetanzahl des getesteten Dieselkraftstoffs CN = 53,6.

Die Vorgabe für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773 wird nur von den ORG- und LOK-Cetanzahlen der Variante 14 erfüllt. Die statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen weisen im Vergleich zu den nicht korrigierten ORG-Cetanzahlen eine größere Spannweite auf.

Die geringen Schwankungen der gemessenen Zündverzüge der Einzelmessungen werden durch das LOK-Statistikprogramm zum Teil als Ausreißer identifiziert. Weisen die nicht korrigierten Cetanzahlen eine von Haus aus geringe Spannweite auf, kann diese Korrektur der Messergebnisse zu einer Erhöhung der Spannweite der statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen führen.

6.2.2 Cetanzahlmessung mit größerem Einspritzdüsendurchmesser

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Cetanzahlmessung mit unterschiedlichen Einspritzdüsen beschrieben. Die bisherigen Messungen wurden bei einem Düsenlochdurchmesser von 0,25 mm durchgeführt, der Durchmesser der nun zum Einsatz kommenden Einspritzdüse beträgt 0,35 mm.

Des Weiteren wurde der Druck in der Brennkammer des FIT-1 zwischen 20 und 25 bar variiert. Die Einstellungen der Varianten 15 bis 18 können aus Tabelle 2 entnommen werden.

In Abbildung 15 sind die Ergebnisse von 4 Cetanzahlmessungen bei je 20 Einzelmessungen (Einspritzungen) mit handelsüblichem Dieselkraftstoff (CN = 53,6 im Prüfmotor) dargestellt.

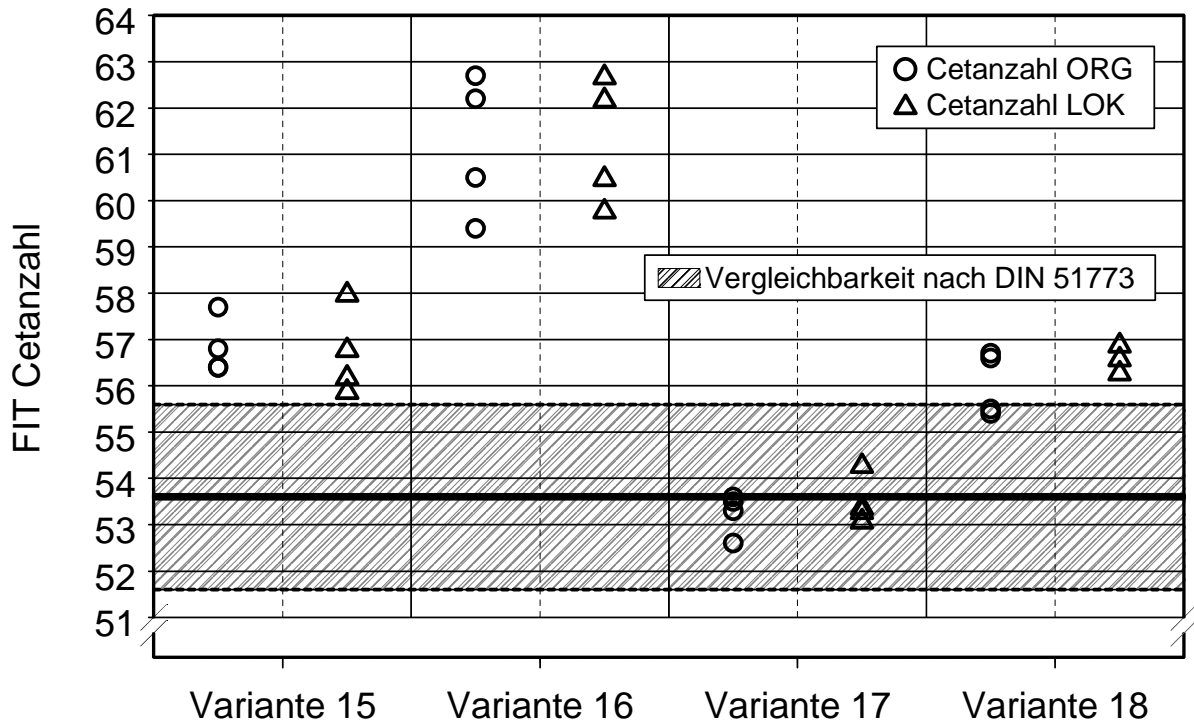


Abbildung 15: ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Dieselkraftstoff (CN = 53,6 im Prüfmotor) der Varianten 15, 16, 17 und 18

Die Vorgaben für die Vergleichbarkeit nach DIN 51773 werden lediglich von den ORG- und LOK-Cetanzahlen der Variante 17 erfüllt.

Die Varianten 15, 16 und 18 weisen ein zum Teil wesentlich höheres Cetanzahlniveau auf, als bisher gemessen wurde.

In Tabelle 10 sind die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG- und LOK-Cetanzahlen sowie die Mittelwerte der gemessenen Zündverzüge dargestellt.

Tabelle 10: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzüge für die Varianten 15, 16, 17 und 18 von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen

Variante	\bar{x} (FIT-CN)		\bar{x} (ZV)		R (FIT-CN)		s (FIT-CN)	
	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK
Variante 15	56,8	56,7	6,55	6,57	1,3	2,1	0,61	0,93
Variante 16	61,2	61,3	5,84	5,83	3,3	2,9	1,53	1,37
Variante 17	53,3	53,5	5,28	5,27	1,0	1,2	0,45	0,53
Variante 18	56,1	56,5	4,81	4,80	1,3	0,6	0,70	0,29

Die Mittelwerte der Cetanzahlmessungen mit den Einstellungen der Variante 17 bewegen sich auf demselben Cetanzahlniveau wie die im Prüfmotor ermittelte Cetanzahl des getesteten Dieselkraftstoffs CN = 53,6.

Die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773 werden von den ORG-Cetanzahlen der Variante 17 und von den LOK-Cetanzahlen der Variante 18 erfüllt. Aufgrund der geringen Spannweite der LOK-Cetanzahlen wird Variante 18 ebenfalls für die Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff weiterverfolgt. Für die folgenden Cetanzahlmessungen mit größerem Einspritzdüsenlochdurchmesser bietet jedoch Variante 17 die bessere Ausgangsbasis.

6.3 Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff

Die Ergebnisse der Cetanzahlmessungen mit den Einstellungen der Variante 14 von zwei Rapsölkraftstoffproben, gemäß dem RK-Qualitätsstandard, sind in Abbildung 16 dargestellt.

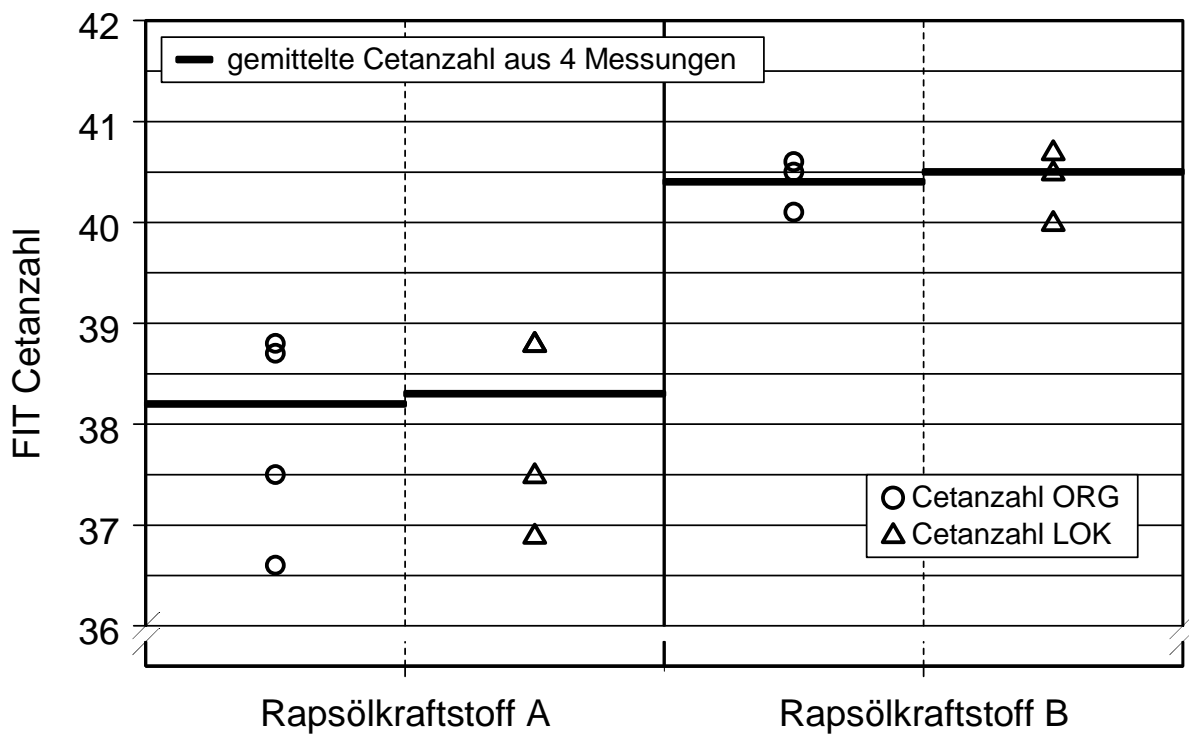


Abbildung 16: ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen zweier Rapsölkraftstoffproben (Variante 14)

Da die Cetanzahl der jeweiligen Rapsölproben nicht anderweitig ermittelt werden konnte, kann keine Aussage über die Vergleichbarkeit nach DIN 51773 gemacht werden.

Trotz identischer Messgeräteeinstellung bei der Cetanzahlmessung unterscheiden sich die gemessenen FIT-Cetanzahlen der beiden Rapsölkraftstoffe deutlich in ihrer Spannweite. In Tabelle 11 sind die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG- und LOK-Cetanzahlen sowie die Mittelwerte der gemessenen Zündverzüge dargestellt.

Tabelle 11: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzüge für die Rapsölkraftstoffe A und B von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen

Kraftstoff	\bar{x} (FIT-CN)		\bar{x} (ZV)		R (FIT-CN)		s (FIT-CN)	
	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK
RK A	38,2	38,3	6,9	6,9	2,2	1,9	1,11	0,97
RK B	40,4	40,5	7,6	7,6	0,5	0,7	0,22	0,33

Die Mittelwerte der Cetanzahlmessungen beider Rapsölkraftstoffe liegen auf dem Niveau der von WIDMANN (1992) [26] im Prüfmotor bestimmten Cetanzahlen von Rapsölkraftstoff ohne Lagerungseinfluss CN = 39,5 und sind deutlich unter dem Cetanzahlniveau von handelsüblichem Dieselmotorkraftstoff CN ³ 51,0.

Die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773 werden nur von den ORG- und LOK-Cetanzahlen der Messung von Rapsölkraftstoff B eingehalten. Wiederum liegt die Spannweite der statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen geringfügig über den nicht korrigierten ORG-Cetanzahlen (siehe 6.2.1). Die Spannweite der Cetanzahlmessungen des Rapsölkraftstoffs A konnte durch die statistische Ausreißerkorrektur mit dem LOK-Programm verbessert werden.

Bei einer visuellen Kontrolle der Einspritzdüse des FIT-1 nach vier Cetanzahlmessungen mit Rapsölkraftstoff A wurden Ablagerungen festgestellt. Dies würde die qualitativ schlechtere Cetanzahlmessung des Rapsölkraftstoff A in Bezug auf die Wiederholbarkeit erklären. Die folgenden Messungen mit Rapsölkraftstoff B erfolgten mit einer zuvor gereinigten Einspritzdüse. Eine anschließende Sichtprüfung der Einspritzdüse ergab wesentlich geringere Ablagerungen als bei Rapsölkraftstoff A festgestellt.

Um die qualitative Verbesserung einer Cetanzahlmessung durch eine optimierte Messgeräteeinstellung zu verdeutlichen, wird im Folgenden auf die Spannweite der Zündverzüge der Einzelmessungen bei einer Diesel- und Rapsölmessung unter Verwendung der Einstellungen der Varianten 13 und 14 eingegangen.

Eine Gegenüberstellung der Zündverzüge der Einzelmessungen des Rapsölkraftstoffes B mit den Zündverzügen der Messung des handelsüblichen Dieselmotorkraftstoffes (CN = 53,6 im Prüfmotor) für die Variante 13 ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Spannweite der Zündverzugszeiten einer Mes-

sung, bei der Ermittlung der Cetanzahl von Rapsöl- beziehungsweise Dieselkraftstoff mit dem FIT-1 sind eng an die jeweiligen Einstellungen der Messparameter gekoppelt.

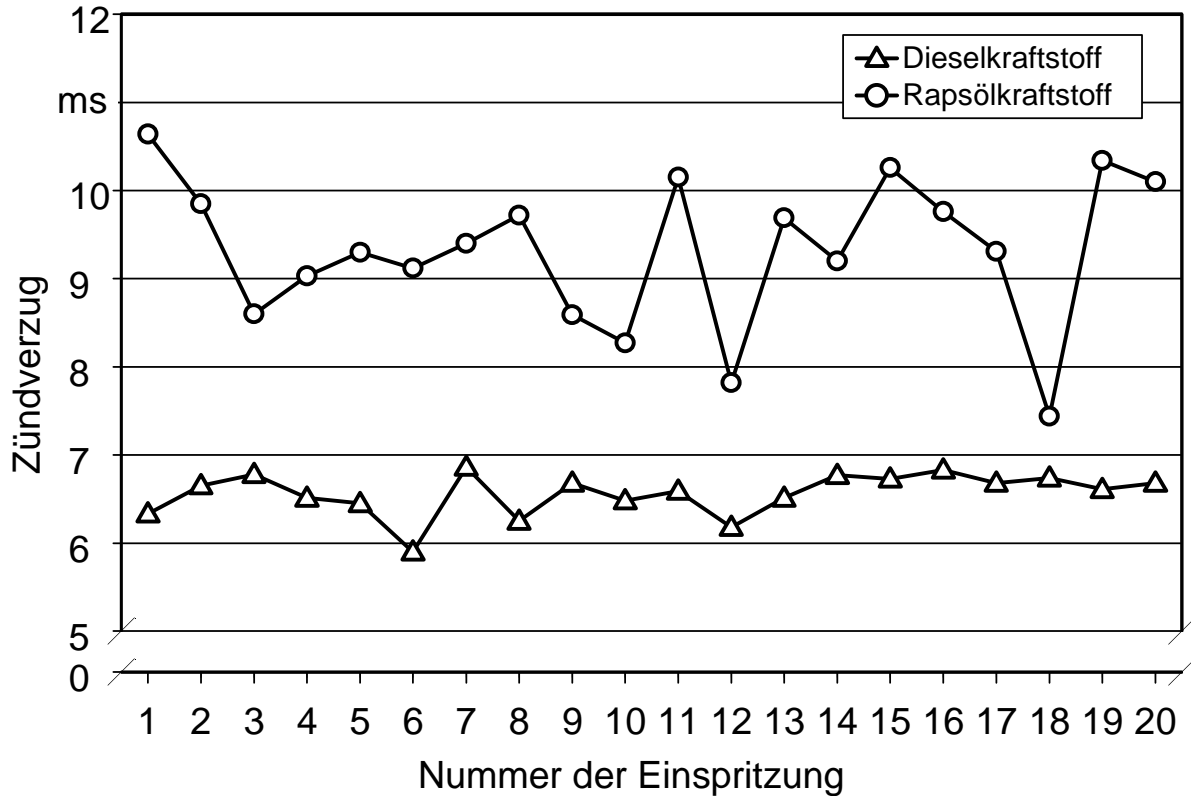


Abbildung 17: Zündverzögerungen der Einzelmessungen einer Cetanzahlmessung mit Rapsölkraftstoff B und Dieselmkraftstoff (CN = 53,6) für Variante 13

Deutlich zeigt sich, dass die Zündverzögerungen der Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff eine wesentlich größere Spannweite als die der Dieselmkraftstoffmessung aufweisen.

Eine Gegenüberstellung der Zündverzögerungen der Einzelmessungen des Rapsölkraftstoffes B mit den Zündverzögerungen der Messung des handelsüblichen Dieselmkraftstoffes (CN = 53,6 im Prüfmotor) für die Variante 13 ist in Abbildung 18 dargestellt.

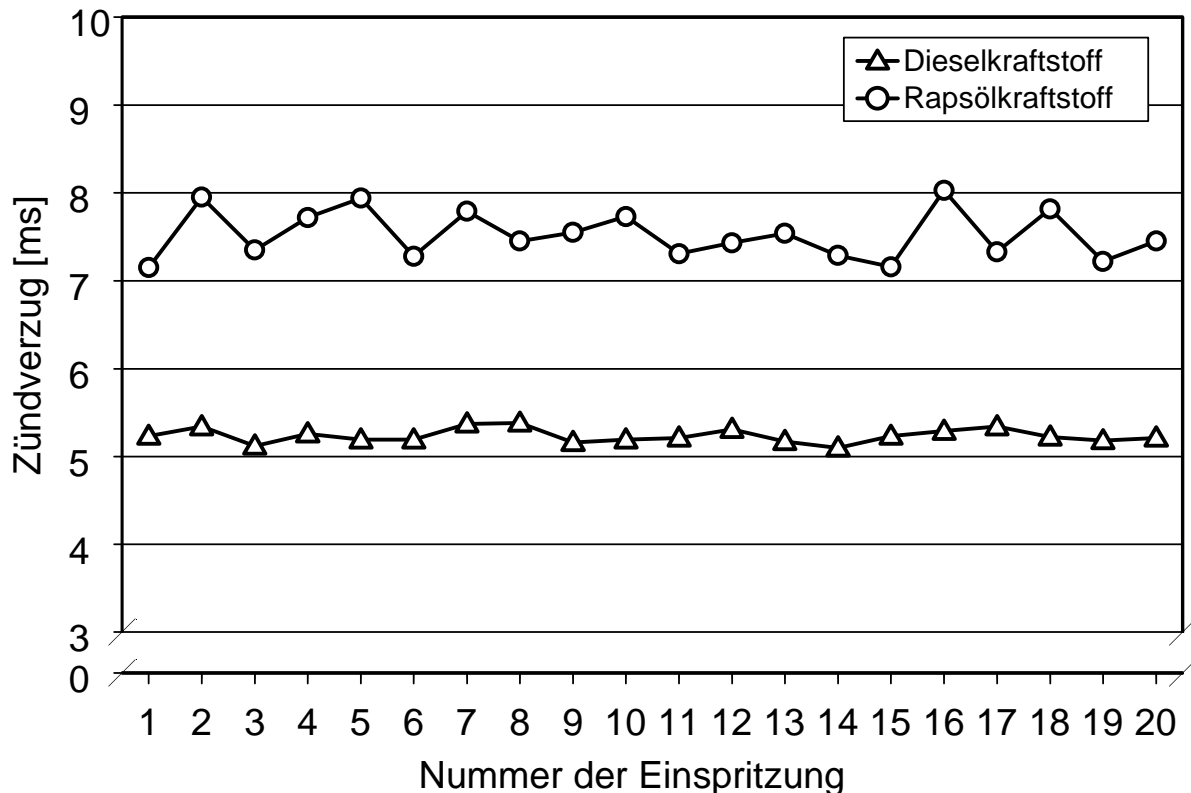


Abbildung 18: Zündverzögerungen der Einzelmessungen einer Cetanzahlmessung mit Rapsölkraftstoff B und Diesekraftstoff ($CN = 53,6$) für Variante 14

Bei Verwendung der optimierten Messgeräteeinstellung der Variante 14 sind die Spannweiten der gemessenen Zündverzögerungen sowohl für Diesekraftstoff, als auch für Rapsölkraftstoff wesentlich geringer als im Vergleich zu Variante 13. Somit hat die Veränderung der Einstellungen nicht nur eine Auswirkung auf die Cetanzahlmessung mit Diesekraftstoff, sondern verbessert auch die Genauigkeit der Messung von Rapsölkraftstoff.

Abbildung 18 zeigt deutlich, dass die gemessenen Zündverzögerungen immer geringen Schwankungen unterliegen.

Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff unter Verwendung einer Einspritzdüse mit einem Düsenlochdurchmesser von 0,35 mm

Um der festgestellten Verharzungsneigung des Rapsölkraftstoffes entgegenzuwirken, wurde bei folgenden Messungen eine Einspritzdüse mit größerem Düsendurchmesser (0,35 mm) verwendet. Es wurden Cetanzahlmessungen mit Rapsölkraftstoff A unter Verwendung der Einstellungen der Varianten 17 und 18 durchgeführt. Bei Versuchen mit den Einstellungen der Varianten 15 und 16 mit je 2 Wiederholungen, hielten lediglich die Ergebnisse aus Variante 15 die Anforderungen an die Vergleichbarkeit nach DIN 51773 ein. Variante 15 wird aber aufgrund der ungenügenden Messgenauigkeit bei der Zündwilligkeitsbestimmung von Diesekraftstoff bei folgenden Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Cetanzahlmessungen mit Rapsölkraftstoff A unter Verwendung der Einstellungen der Varianten 17 und 18 sind in Abbildung 19 dargestellt.

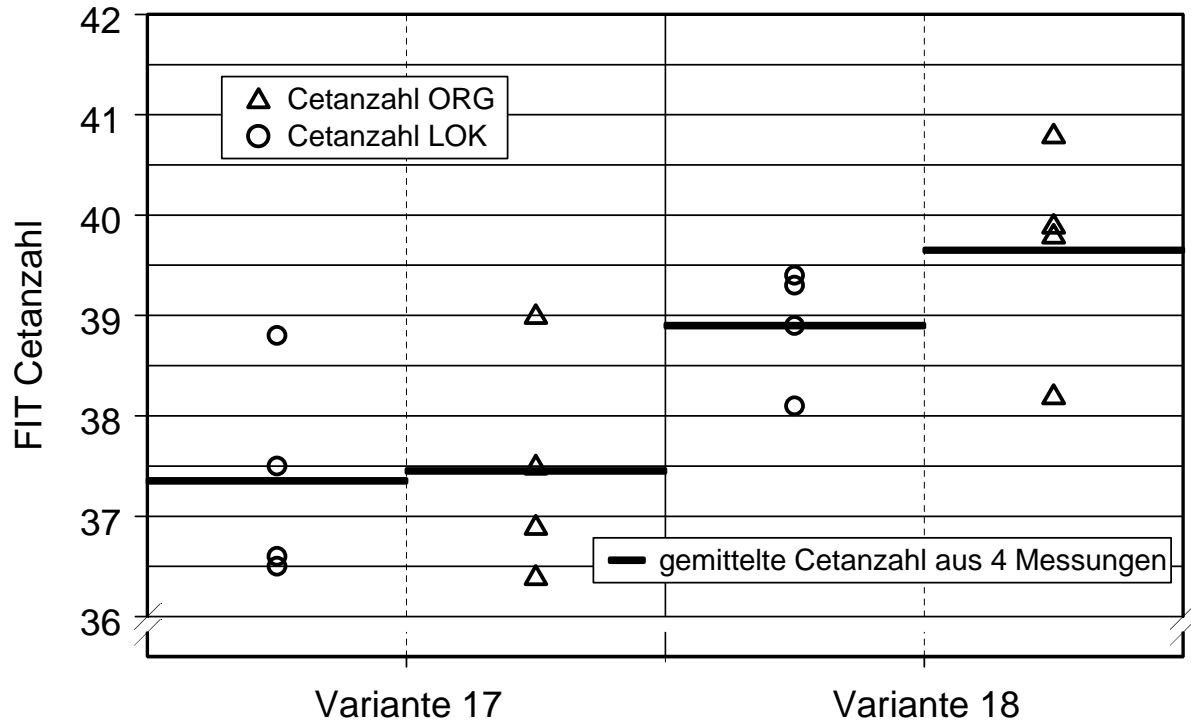


Abbildung 19: ORG- und LOK-Cetanzahlen von 4 Messungen à 20 Einzelmessungen mit Rapsölkraftstoff A der Varianten 17 und 18

Ausgehend vom Mittelwert der zuvor gemessenen Cetanzahlen von Rapsölkraftstoff A mit den Einstellungen der Variante 14 (LOK-CN = 38,3), erfüllen die ORG- und LOK-Cetanzahlen der Variante 17 sowie die ORG-Cetanzahlen der Variante 18 die Vorgaben für die Vergleichbarkeit nach DIN 51773.

In Tabelle 12 sind die Mittelwerte, die Spannweiten und die Standardabweichungen der ermittelten ORG- und LOK-Cetanzahlen sowie die Mittelwerte der gemessenen Zündverzögerungen dargestellt.

Tabelle 12: Mittelwerte, Spannweiten und Standardabweichungen der ORG- und LOK-Cetanzahlen mit Mittelwerten der Zündverzögerungen für die Varianten 17 und 18 von 4 Cetanzahlmessungen à 20 Einzelmessungen

Variante	\bar{x} (FIT-CN)		\bar{x} (ZV)		R (FIT-CN)		s (FIT-CN)	
	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK	ORG	LOK
Variante 17	37,4	37,5	7,00	7,02	2,3	2,6	1,07	1,13
Variante 18	38,9	39,7	5,90	5,85	1,3	2,6	0,59	1,08

Die Mittelwerte der Cetanzahlmessungen beider Varianten liegen wiederum deutlich unter dem Cetanzahlniveau von handelsüblichem Dieseldieselkraftstoff (CN³ 51,0). Die von WIDMANN (1992) [26] im Prüfmotor bestimmte Cetanzahl von Rapsölkraftstoff von 39,5 wird annähernd bei der Cetanzahlmessung mit Variante 18 erreicht.

Weder die ORG- noch die LOK-Cetanzahlen der beiden Varianten erfüllen die Vorgaben für die Wiederholbarkeit nach DIN 51773. Die Spannweite der statistisch korrigierten LOK-Cetanzahlen liegt bei beiden Varianten über der Spannweite der nicht korrigierten ORG-Cetanzahlen. Die Spannweiten der Cetanzahlmessungen wurden durch die statistische Ausreißerkorrektur mit dem LOK-Programm nicht verringert.

Eine geringfügige Verringerung der Verharzungsneigung bei Verwendung einer Einspritzdüse mit größerem Düsenlochdurchmesser konnte für die beschriebenen Messbedingungen festgestellt werden. Nach vier bis acht Cetanzahlmessungen mit 20 Einspritzungen musste jedoch die Düse wiederum gesäubert werden, da sich erhebliche Ablagerungen gebildet hatten.

Werden die Wartungsintervalle der Cetanzahlmessungen bei veränderten Düsenlochdurchmesser miteinander verglichen, so erhöht sich die mögliche Anzahl an Cetanzahlmessungen um maximal zwei bis drei bei Verwendung der 0,35 mm Einspritzdüse, bei gleichzeitig deutlich schlechterer Wiederholbarkeit der ermittelten Cetanzahlen.

6.4 Beschreibung der Prüfmethode für die Zündwilligkeitsbestimmung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester

Ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen wird für die Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester folgende Prüfmethode vorgeschlagen.

Die Einstellung der Messparameter des FIT-1 sollte gemäß Variante 14 vorgenommen werden. Die Settings können aus Tabelle 13 entnommen werden.

Tabelle 13: Optimierte Messparameter für die Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester

Parameter	Beschreibung	Einstellung
chamber press. ref.	Voreinstellung Brennkammerdruck	20 bar
chamber temp. ref.	Voreinstellung Brennkammertemperatur	525 °C
fuel temp. ref.	Voreinstellung Kraftstofftemperatur	50 °C
max. fuel temp.	maximale Kraftstofftemperatur	100 °C
chamber start press.	Anfangsfülldruck der Brennkammer	15 bar
chamber press. hyst.	zulässige Abweichung des Brennkammerdrucks	0,3 bar
emptying press. limit	verbleibender Restdruck in der Brennkammer	0,3 bar
max. # injections	Anzahl der Einspritzungen	20
chamber trajektor gain	Regelungsparameter für die Brennkammertemperatur	10
Einspritzdüse	Düsenlochdurchmesser	0,25 mm

Die gemessenen Zündverzögerungen werden mit dem LOK-Statistikprogramm auf Ausreißer überprüft, lediglich der statistisch korrigierte Mittelwert darf für die Cetanzahlermittlung verwendet werden.

Vor der Messung des zu testenden Rapsölkraftstoffs muss die Funktion des Fuel Ignition Testers mit Dieselkraftstoff bekannter Cetanzahl (Qualitätssicherungsprobe) überprüft werden. Der verwendete Dieselkraftstoff muss vorab mit einem Spritzenaufsatzfilter durch eine Cellulose-Acetat-Membran (Porosität 5 µm) gefiltert und dabei direkt in den Kraftstoffbehälter eingefüllt werden. Mit 20 ml des verwendeten Dieselkraftstoffs wird die Einspritzeinheit vorab gespült. Die eigentliche Cetanzahlmessung erfolgt mit 50 ml des gereinigten Dieselkraftstoffs. Das Ergebnis aus dieser Messung dient als Vergleichswert, um eine eventuell auftretende Verharzung der Einspritzdüse bei der Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff frühzeitig zu erkennen.

Anschließend werden 20 ml des zu testenden Rapsölkraftstoffs (über einen Spritzenaufsatzfilter) durch eine Cellulose-Acetat-Membran mit mittlerer Porosität von 5 µm gefiltert und dabei direkt in den Kraftstoffbehälter eingefüllt. Diese Kraftstoffmenge wird nur zum Spülen der Einspritzeinheit verwendet, um daraus Restkraftstoffmengen aus der vorherigen Messung zu entfernen. Die eigentliche Cetanzahlmessung erfolgt mit 50 ml gefiltertem Rapsölkraftstoff.

Nach Abschluss der Cetanzahlmessung wird nochmals Dieselkraftstoff bekannter Cetanzahl auf seine Zündwilligkeit hin untersucht und das Ergebnis mit dem der Qualitätssicherungsprobe verglichen. Erfüllen die gemessenen Cetanzahlen für Dieselkraftstoff nicht die Vorgaben der Wiederholbarkeit nach DIN 51773, so muss die Messung verworfen werden und eine Sichtprüfung der Einspritzdüse erfolgen.

Werden bei der visuellen Kontrolle der Einspritzdüse Ablagerungen in Form von Verharzungen oder Verkokungen festgestellt, so muss diese gereinigt oder ausgetauscht werden. Die Reinigung

kann in einem Ultraschallbad mit destilliertem Wasser unter Zugabe eines handelsüblichen Spülmittels erfolgen. Nach einer Verweilzeit von ca. zwei Stunden können die vorhandenen Ablagerungen meist leicht abgelöst werden. Bei hartnäckigen Verunreinigungen sollte die Einspritzdüse mit einem feinen Polierschwamm gesäubert und anschließend nochmals im Ultraschallbad gereinigt werden. Eventuell vorhandene Spülmittelreste werden mit destilliertem Wasser abgespült. Die Trocknung der Einspritzdüse erfolgt im Trockenschrank.

6.5 Messung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoffproben

Mit der entwickelten Messmethode zur Cetanzahlbestimmung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester wurden mehrere Rapsölkraftstoffproben aus dezentralen Ölgewinnungsanlagen auf ihre Zündwilligkeit untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt.

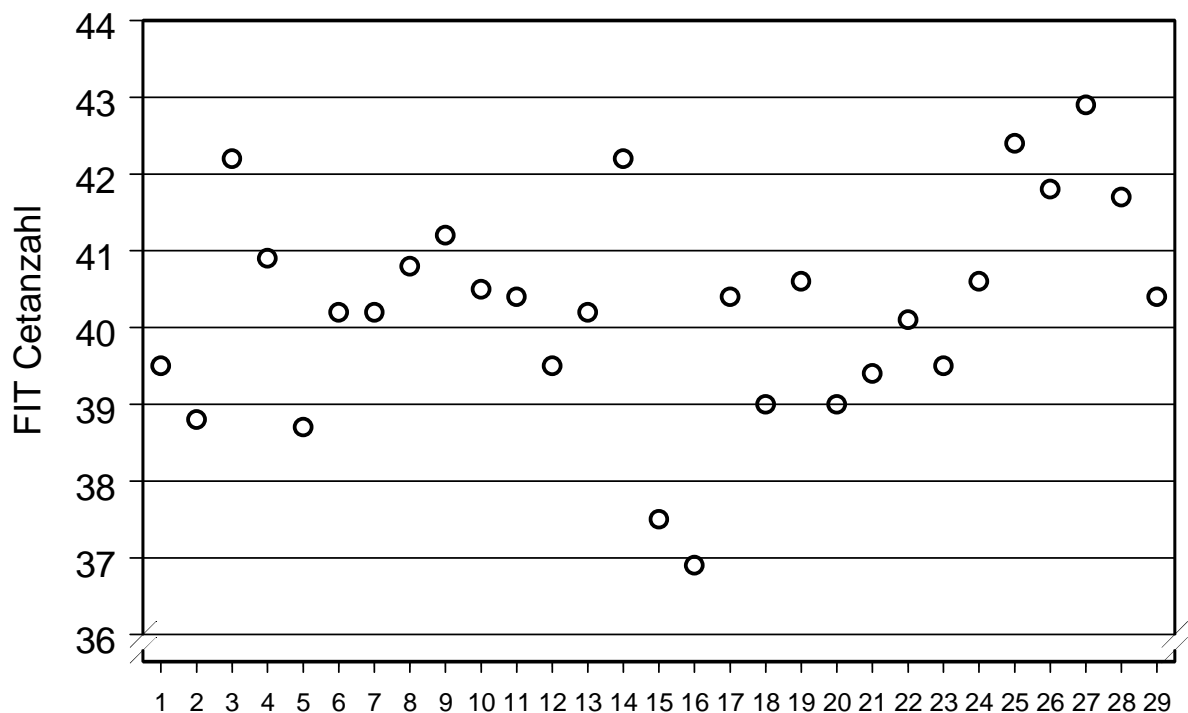


Abbildung 20: Cetanzahlmessungen mit je 20 Einzelmessungen von Rapsölkraftstoffproben

Die gemessenen FIT-Cetanzahlen der Rapsölkraftstoffproben liegen zwischen 37 und 43. Keiner der untersuchten Rapsölkraftstoffe erfüllt die Mindestanforderungen für die Zündwilligkeit von Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 (CN \geq 51). Die FIT-Cetanzahlen der untersuchten Rapsölkraftstoffe liegen auf dem Niveau der von WIDMANN (1992) [26] im Prüfmotor bestimmten Cetanzahl von Rapsölkraftstoff ohne Lagerungseinfluss CN = 39,5.

6.6 Überprüfung möglicher Einflüsse auf die ermittelten Cetanzahlen

Die Cetanzahlen der untersuchten Rapsölkraftstoffe variieren zwischen 37 und 43. Um den Grund dieser Schwankungen von bis zu 7 CN zu untersuchen, wurden die gemessenen Cetanzahlen gegen die Peroxidzahl, Neutralisationszahl sowie der Oxidationsstabilität der untersuchten Proben aufgetragen, um eine mögliche Korrelation festzustellen.

Abbildung 21 zeigt die graphische Auswertung der ermittelten FIT-Cetanzahlen mit den Peroxidzahlen der untersuchten Rapsölkraftstoffe.

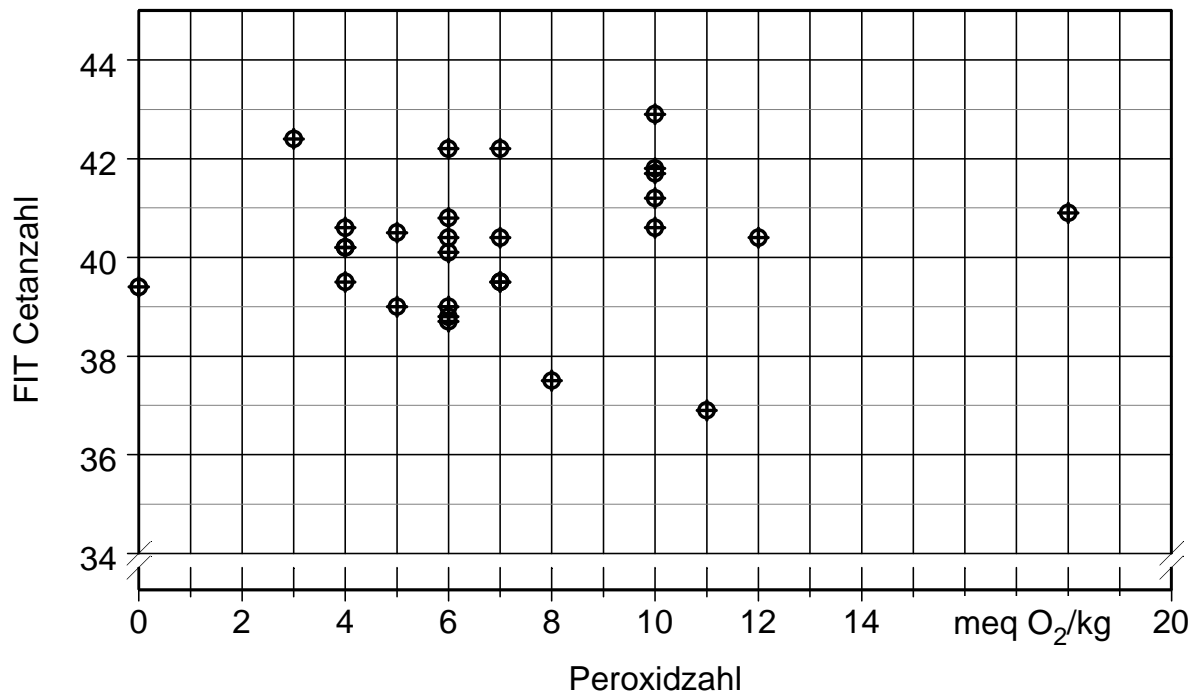


Abbildung 21: Korrelation zwischen den ermittelten Cetanzahlen und der Peroxidzahl der untersuchten Rapsölkraftstoffe

Die graphische Auswertung der Analyseergebnisse zeigt keine Abhängigkeit zwischen FIT-Cetanzahl und Peroxidzahl. Der von WIDMANN (1992) [26] beschriebene Anstieg der im Prüf-motor gemessenen Cetanzahl von Rapsölkraftstoff in Verbindung mit steigender Peroxidzahl kann für den hier vorliegenden Wertebereich nicht bestätigt werden. Bei den von WIDMANN (1992) [26] durchgeführten Cetanzahlmessungen lagen die ermittelten Peroxidzahlen der untersuchten Rapsölproben zwischen 45 und 215 meq O₂/kg.

In Abbildung 22 ist die graphische Auswertung der ermittelten FIT-Cetanzahlen mit den Neutralisationszahlen der untersuchten Rapsölkraftstoffe dargestellt.

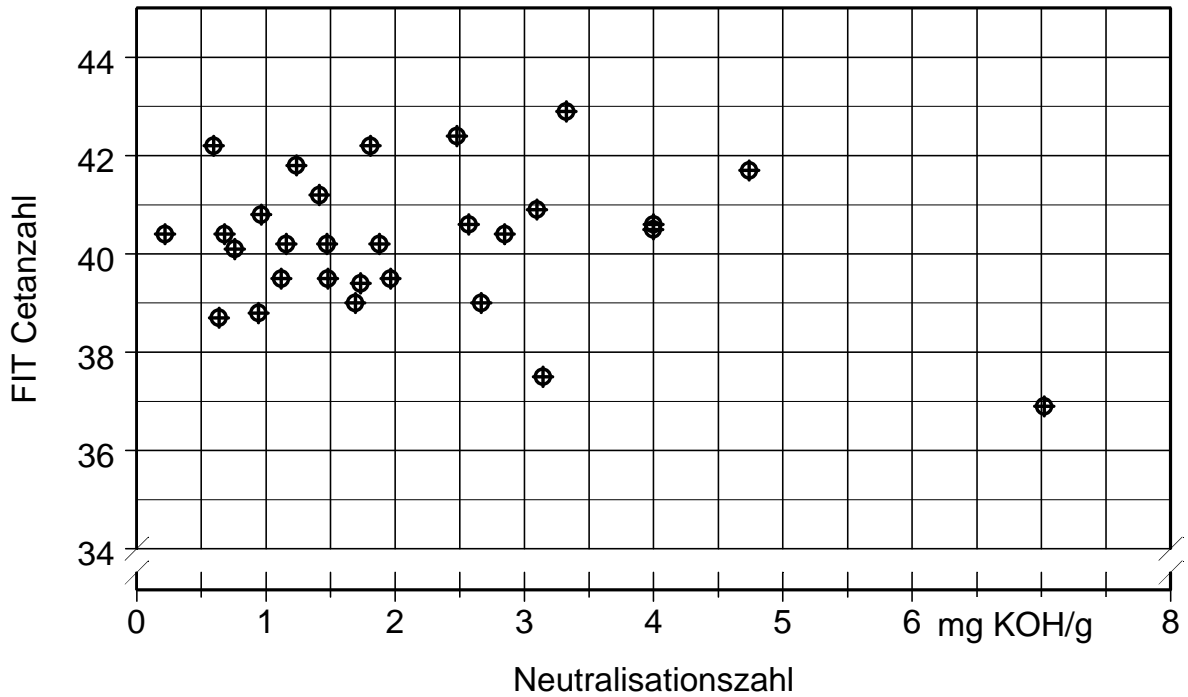


Abbildung 22: Korrelation zwischen den ermittelten Cetanzahlen und der Neutralisationszahl der untersuchten Rapsölkraftstoffe

In der graphischen Auswertung ist kein Zusammenhang zwischen der Cetanzahl und der Neutralisationszahl zu erkennen. Es kann im untersuchten Wertebereich nicht von einer Beeinflussung der Zündwilligkeit durch die Anzahl an freien Fettsäuren im Rapsölkraftstoff ausgegangen werden.

Abbildung 23 zeigt die graphische Auswertung der ermittelten FIT-Cetanzahlen mit der Oxidationsstabilität der untersuchten Rapsölkraftstoffe.

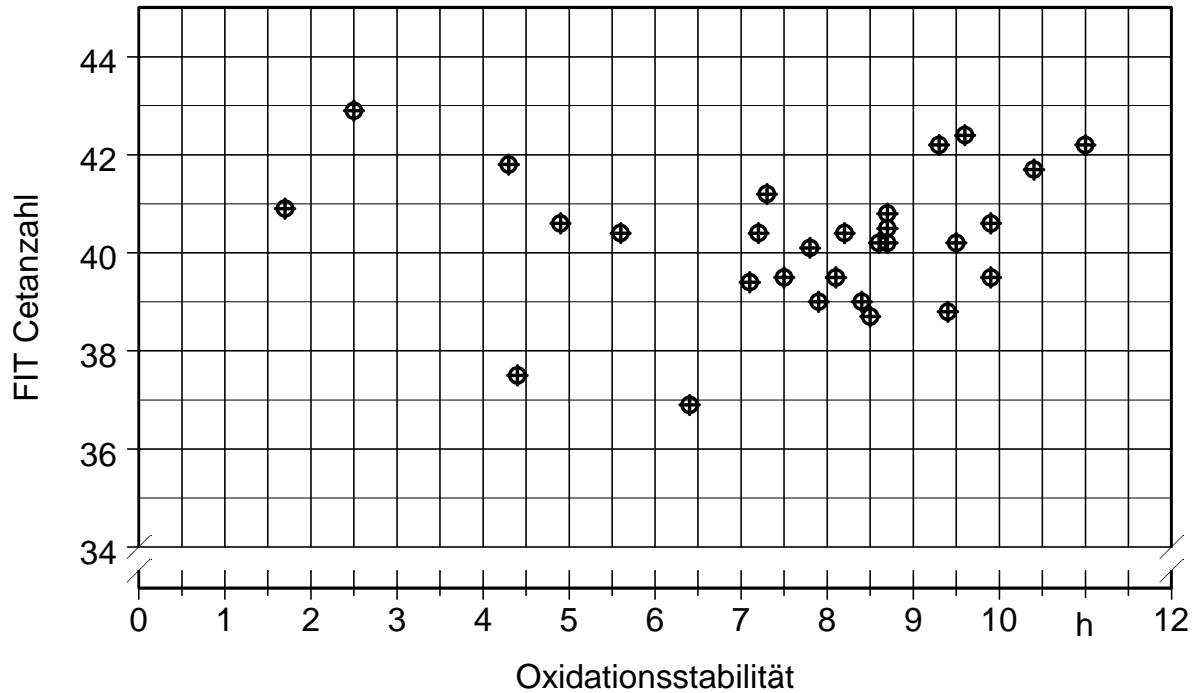


Abbildung 23: Korrelation zwischen den ermittelten Cetanzahlen und der Oxidationsstabilität der untersuchten Rapsölkraftstoffe

Abbildung 23 zeigt keinen Zusammenhang zwischen der Cetanzahl und der Oxidationsstabilität für die untersuchten Rapsölkraftstoffproben. Somit wird eine Beeinflussung der Zündwilligkeit der untersuchten Rapsölkraftstoffe durch unterschiedliche Oxidationsstabilitäten im dargestellten Wertebereich ausgeschlossen.

Ein weiterer Erklärungsansatz für die Unterschiede in der Zündwilligkeit der einzelnen Rapsölkraftstoffe ist der im Öl enthaltene Anteil an Phospholipiden. Diese verringern möglicherweise in höheren Konzentrationen die Oberflächenspannung und beeinflussen somit positiv die Zerstäubungsgüte, durch die Ausbildung kleinerer Tröpfchen bei der Kraftstoffeinspritzung. Eine nachträgliche Gegenüberstellung der Phosphorgehalte mit den gemessenen Cetanzahlen ergab keine Korrelation.

Ein Sorteneinfluss auf die gemessene Cetanzahl der untersuchten Rapsöle kann genauso wenig ausgeschlossen werden, wie ein Unterschiede im Standort und Kulturmaßnahmen. Da viele der hier untersuchten Rapsölkraftstoffe nicht aus sortenreiner Rapssaar gewonnen worden sind und keine Angaben zu den verwendeten Sorten gemacht wurden, war eine Überprüfung der oben genannten Einflüsse auf die gemessene Cetanzahl im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht möglich.

6.7 Störungen am Messgerät

Im Zeitraum der Untersuchungen traten am Messgerät folgende Störungen auf.

Eine poröse Pneumatikleitung für die Steuerung des Einspritzsystems musste ebenso wie ein Steuerungsventil (SMC Solenoid Valve) des Pneumatiksystems zu Anfang der Versuchsreihen ausgetauscht werden.

Der verwendete Kistler-Drucksensor musste, vor der Überholung und Wartung des Messgeräts durch den Gerätehersteller, öfters neu kalibriert werden. Dies war vor allem bei Cetanzahlmessungen mit einem Wechsel von hohem auf niedriges Brennkammertemperaturniveau der Fall.

Die in Vorversuchen festgestellte Abnahme der Zündverzugszeiten während einer Messreihe ist in Abbildung 24 dargestellt. Dies konnte auf eine leichte Verharzung der Einspritzdüse im Laufe der ersten Vorabtests mit Rapsölkraftstoff zurückgeführt werden. Im konkreten Fall wurden diese Ablagerungen vermutlich durch die vermehrten Versuche mit Dieselkraftstoff abgebrannt, wodurch sich die Qualität der Einspritzung verbesserte.

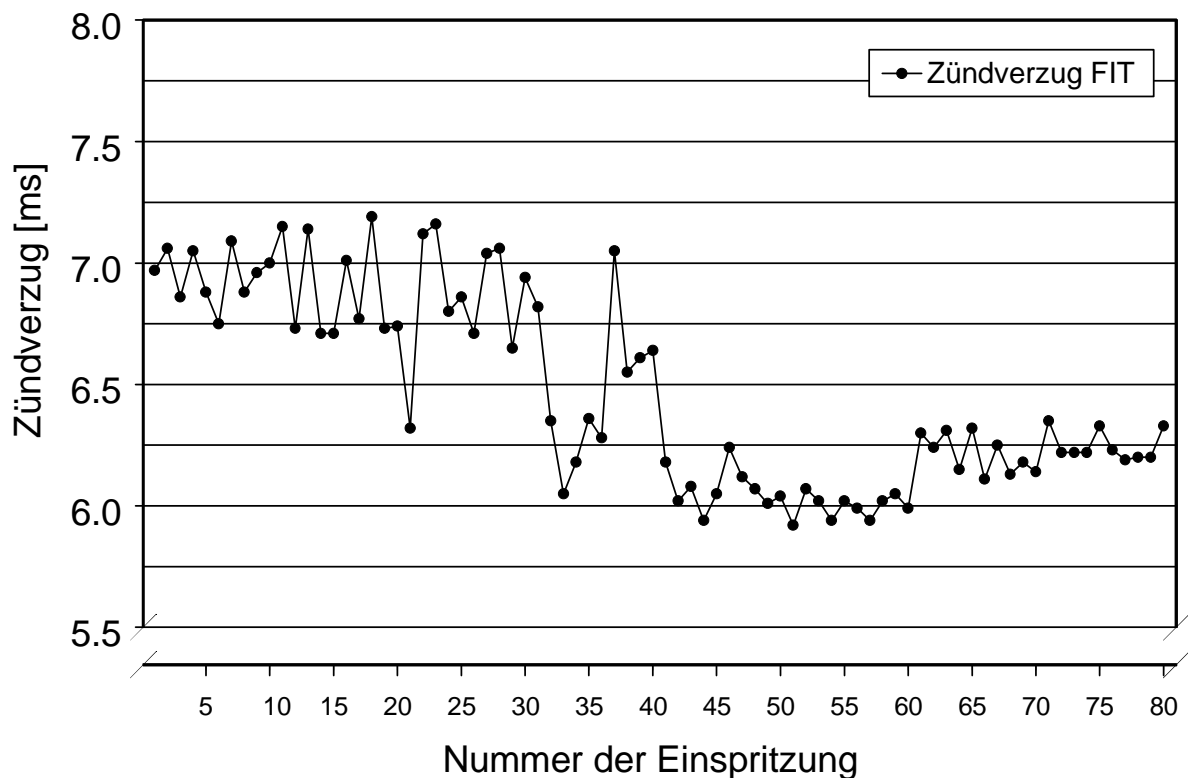


Abbildung 24: Schwankungen der Zündverzüge von 4 aufeinanderfolgenden Cetanzahlmessungen mit je 20 Einspritzungen von Dieselkraftstoff bekannter Cetanzahl bei unveränderten Messbedingungen

Im Verlauf der Messreihen mit Dieselmotorkraftstoff wurde ein rostroter Niederschlag in der Einspritz-
einheit festgestellt. Dieser verstopfte die Zulaufbohrungen der Einspritzdüse sowie die Leitungen
des Spülventils. Da eine gründliche Reinigung der Einspritzeinheit keine Verbesserung ergab,
musste die Bosch Einspritzpumpe ausgetauscht werden. Auch nach Rücksprache mit dem Herstel-
ler konnte keine Erklärung für das Auftreten des Niederschlags gefunden werden. Eine Mischung
aller im FIT getesteten Kraftstoffe blieb auch nach mehrmaligem Erhitzen und mehrwöchiger
Lagerung klar, ein Niederschlag bildete sich nicht.

Ein Leck im Bereich der Abdichtung am Brennkammerboden musste durch einen Servicetechni-
ker der Firma Fueltech AS behoben werden.

Die bei der Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff immer wieder auftretenden Ablagerungen an
der Einspritzdüse sind in Abbildung 25 dargestellt.



*Abbildung 25: Ablagerungen an der Einspritzdüse des FIT-1 nach mehreren Cetanzahlmessun-
gen von Rapsölkraftstoff*

Die angesprochenen Ablagerungen an der Einspritzdüse treten, wie schon in Kapitel 6.3 beschrie-
ben, regelmäßig bei der Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester auf.

Eine blanke Oberfläche wirkt der Verharzungsneigung entgegen. Abbildung 26 zeigt die Ein-
spritzeinheit des FIT-1 nach Austausch der Einspritzdüse.

Bei einem Kraftstoffwechsel von Rapsöl- auf Dieselmotorkraftstoff treten zusätzliche Ablagerungen, in
Form von Verkokungen an der Einspritzdüse, auf.

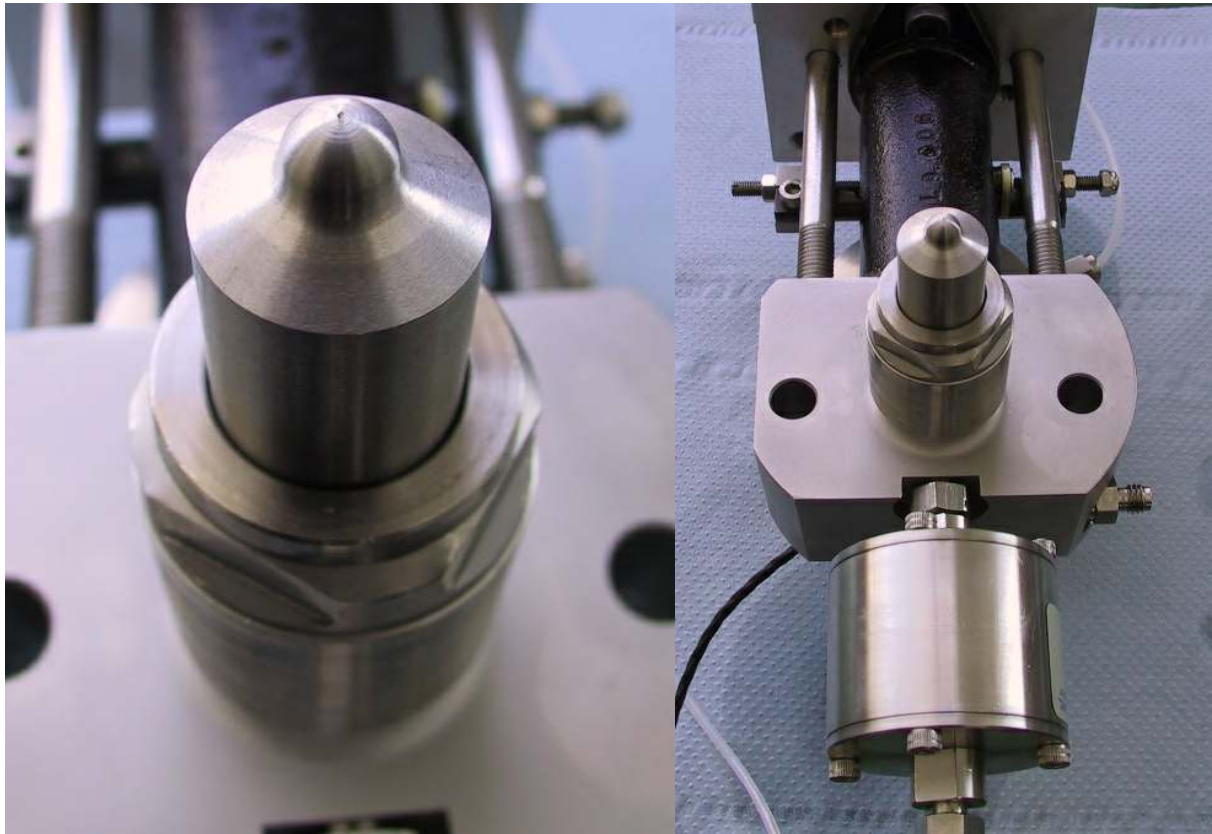


Abbildung 26: Einspritzeinheit FIT-1 nach Austausch der Einspritzdüse

6.8 Abschließende Beurteilung der CN-Messung mit dem FIT

Die Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester (FIT-1) bietet im Vergleich zu der CN-Bestimmung im Prüfmotor mehrere Vorteile.

Die Messung mit dem FIT erfolgt, anders als bei der Verwendung eines Prüfmotors, vollautomatisch. Eine aufwändige Überwachung des Messgeräts während der gesamten Prüfdauer entfällt. Ein weiterer Vorteil ist die wesentlich geringere Probenmenge die für eine Cetanzahlbestimmung benötigt wird. Für eine CN-Messung mit dem FIT bestehend aus 20 Einzeleinspritzungen werden ca. 50 ml des zu prüfenden Kraftstoffs verbraucht, im Gegensatz zu ca. 2 l bei Messungen in einem Prüfmotor.

Der Wartungsaufwand bei der Cetanzahlmessung von Dieselmotorkraftstoff mit dem FIT ist aufgrund des Fehlens von Verschleiß- und beweglichen Bauteilen wesentlich geringer als bei einem Prüfmotor. Weitere Kosten entstehend lediglich durch die Druckluftversorgung.

Als Nachteil bei der Cetanzahlbestimmung von Rapsölkraftstoff mit dem FIT sind die nach zwei bis fünf Messungen (mit je 20 Einspritzungen) auftretenden Verharzungen bzw. Verkokungen der Einspritzdüse zu nennen. Diese verursachen einen nicht unerheblichen Reinigungs- und Wartungsaufwand in Bezug auf das Einspritzsystem. Ähnliche Ablagerungen sind auch bei der CN-Bestimmung von Rapsölkraftstoff mit einem Prüfmotor zu beobachten, die hier jedoch schon nach

kurzer Prüfdauer auftreten und somit zu einer möglichen Verfälschung des Messergebnissen führen können.

Somit ergeben sich Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich des verwendeten Fuel Ignition Testers.

Eine einfachere Demontage der Einspritzeinheit zur Reinigung der Einspritzdüse wurde die Praxistauglichkeit des Fuel Ignition Testers bei der Zündwilligkeitsbestimmung von Rapsölkraftstoff erheblich verbessern. Des weiteren gilt es die Ursachen für die beobachtete Verharzungsneigung des Rapsölkraftstoff zu finden und wenn möglich diese durch eine technische Veränderung des FIT zu vermindern.

Da die hier beschriebene Messmethodik lediglich auf handelsüblichen Dieselkraftstoff, in einem engen Cetanzahlbereich, optimiert wurde, besteht hier noch weiterer Handlungsbedarf. Es gilt zu klären, ob die beobachteten guten Messergebnisse auch für Kraftstoffen mit unterschiedlichen Cetanzahl-niveaus gelten. Hierbei bietet sich der direkte Vergleich der gemessenen FIT-Cetanzahlen mit den in einem Prüfmotor ermittelten an.

Zusammenfassung

Die Zündwilligkeit, ein beschreibendes Qualitätskriterium von Kraftstoffen für die dieselmotorische Verbrennung, ausgedrückt durch die Cetanzahl, konnte mangels eines geeigneten Prüfverfahrens für Rapsölkraftstoff noch nicht im RK-Qualitätsstandard 05/2000 festgelegt werden.

Die Bestimmung der Cetanzahl von Dieselmotorkraftstoff erfolgt üblicherweise mit dem BASF-Prüfmotor nach DIN 51773, beziehungsweise mit dem CFR-Prüfmotor nach DIN EN ISO 5165. Aufgrund der höheren Viskosität von Rapsölkraftstoff ist in diesen Motoren die Zerstäubungsgüte bei der Kraftstoffeinspritzung ungenügend. Dies führt zu einer unvollständigen Verbrennung und einem schnellen Verkoken der Einspritzdüsen. Eine Anpassung der Prüfmotoren für den Pflanzenölbetrieb wäre aufwändig und kostenintensiv. Somit ist die Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff mit einem alternativen Prüfverfahren sinnvoll.

Im Forschungsvorhaben „Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff“, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, wurde die Eignung des Fuel Ignition Testers der Firma FuelTech AS zur Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff überprüft sowie eine Prüfmethode entwickelt und dokumentiert.

Die Cetanzahlbestimmung mit dem Fuel Ignition Tester erfolgt nach dem Prinzip der dieselmotorischen Verbrennung. Bei der Messung wird der zu prüfende Kraftstoff in einer Verbrennungskammer mit konstantem Volumen, in der sich komprimierte und erhitzte Luft befindet, eingespritzt. Der Kraftstoff zündet und verbrennt. Über den Zeitpunkt der Einspritzung und den Zeitpunkt des Druckanstiegs in der Verbrennungskammer wird der Zündverzug ermittelt. Durch zuvor erstellte Referenzkurven kann die gemittelte Zündverzugszeit von aufeinanderfolgenden Kraftstoffeinspritzungen mit den Zündverzügen von Mischungen aus ASTM-Referenzkraftstoffen (T-22 und U-15) bekannter Cetanzahl verglichen werden.

Zunächst wurde die Cetanzahlbestimmung von Dieselmotorkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Messungen mit Messungen in konventionellen Prüfmotoren und der Wiederholbarkeit der Ergebnisse optimiert. Als Bewertungsgrundlage wurden die Vorgaben für die Cetanzahlbestimmung von Dieselmotorkraftstoff nach DIN 51773 herangezogen.

Hierfür wurde die Anzahl der Einzeleinspritzungen sowie die Regelungsgenauigkeit des Messgeräts hinsichtlich der Messgenauigkeit untersucht. Anschließend wurden die Parameter Brennkammertemperatur und Brennkammerdruck an die optimalen Messbedingungen angepasst und die Einsatzmöglichkeiten einer Einspritzdüse mit größerem Düsenlochdurchmesser überprüft.

Des Weiteren wurde für die statistische Ausreißerererkennung bei den Einzeleinspritzungen der Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester eigens eine Software (LOK-Programm) entwickelt und auf ihre Eignung überprüft.

Die optimierten Einstellungen wurden anhand unterschiedlicher Rapsölkraftstoffe auf ihre Tauglichkeit hin getestet und in eine Prüfmethode für die Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester (FIT-1) von Rapsölkraftstoff übernommen.

Die ermittelten Einstellungen, die abweichend von den Standardeinstellungen des Geräteherstellers eine höhere Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit garantieren, sind aus Tabelle 14 zu entnehmen. Die Einstellungen gelten sowohl für die Cetanzahlmessung von Diesel-, als auch für Rapsölkraftstoff.

Die Prüfmethode wurde für Dieselkraftstoff mit einem Cetanzahlniveau von 50 bis 54 und für Rapsölkraftstoff mit einem Cetanzahlniveau von 37 bis 43 überprüft.

Tabelle 14: Optimierte Messparameter für die Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff mit dem Fuel Ignition Tester

Parameter	Beschreibung	Einstellung
chamber press. ref.	Voreinstellung Brennkammerdruck	20 bar
chamber temp. ref.	Voreinstellung Brennkammertemperatur	525 °C
fuel temp. ref.	Voreinstellung Kraftstofftemperatur	50 °C
max. fuel temp.	maximale Kraftstofftemperatur	100 °C
chamber start press.	Anfangsfülldruck der Brennkammer	15 bar
chamber press. hyst.	zulässige Abweichung des Brennkammerdrucks	0,3 bar
emptying press. limit	verbleibender Restdruck in der Brennkammer	0,3 bar
max. # injections	Anzahl der Einspritzungen	20
chamber trajektor gain	Regelungsparameter für die Brennkammertemperatur	10
Einspritzdüse	Düsenlochdurchmesser	0,25 mm

Die Ergebnisse der Cetanzahlmessungen mit dem Fuel Ignition Tester von Dieselkraftstoff erfüllen die Vorgaben für die Wiederholbarkeit (R £ 1 CN) und Vergleichbarkeit (± 2 CN) nach DIN 51773. Bei der Zündwilligkeitsbestimmung von Rapsölkraftstoff werden die Vorgaben in den meisten Fällen eingehalten. Abweichungen in der Wiederholbarkeit bei der Messung von Rapsölkraftstoff sind auf Ablagerungen an der Einspritzdüse zurückzuführen.

Nach zwei bis fünf Cetanzahlmessungen von Rapsölkraftstoff sind Ablagerungen an der Einspritzdüse zu beobachten. Aus diesem Grund muss vor und nach jeder Cetanzahlmessung von Rapsölkraftstoff eine Messung mit Dieselkraftstoff bekannter Cetanzahl erfolgen (Qualitätssicherungsprobe), um Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Erfüllen die ermittelten Cetanzahlen der Dieselkraftstoffmessungen nicht die vorgeschriebene Wiederholbarkeit nach DIN 51773 (R £ 1 CN), muss die Cetanzahlmessung des Rapsölkraftstoffes verworfen und die Einspritzdüse des Fuel Ignition Testers einer Sichtprüfung unterzogen werden. Ergibt die visuelle Überprüfung der Einspritzdüse Ablagerungen, so muss diese gereinigt oder ausgetauscht werden.

Bei der Zündwilligkeitsbestimmung mit dem Fuel Ignition Tester werden die gemessenen Zündverzögerungen mit dem LOK Statistikprogramm auf Ausreißer überprüft, lediglich der statistisch korrigierte Mittelwert darf für die weitere Cetanzahlermittlung verwendet werden. Das untersuchte Statistikprogramm bietet eine gute und verlässliche Grundlage, etwaige Ausreißer zu identifizieren und verbessert in den meisten Fällen die Güte der Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester.

Die gemessenen Cetanzahlen von 29 Rapsölkraftstoffproben bewegen sich im Bereich von 37 bis 42. Die in der Literatur beschriebenen Cetanzahlen für Rapsölkraftstoff, gemessen im Prüfmotor, liegen in dem hier festgestellten Cetanzahlbereich.

Die Überprüfung möglicher Wechselwirkungen zwischen der Zündwilligkeit und der Peroxidzahl, Oxidationsstabilität oder Neutralisationszahl ergab keine Korrelation.

Insgesamt bietet die Cetanzahlmessung mit dem Fuel Ignition Tester eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem Prüfmotor. Die Messung von Rapsölkraftstoff ist jedoch, bedingt durch die auftretenden Verharzungen an der Einspritzdüse, nur eingeschränkt möglich. Hier besteht aufgrund des nicht unerheblichen Wartungs- und Reinigungsaufwands weiterer Handlungsbedarf.

Summary

A suitable testing method for a descriptive fuel property of the Diesel engine combustion process, the ignition quality, expressed through the Cetane number, is not available for rapeseed oil fuel, yet. Thus, a limiting value could not be included in the “Quality Standard for Rapeseed Oil as a Fuel (RK-Qualitätsstandard) 05/2000”.

For the Cetane number determination of Diesel fuel the BASF test engine (DIN 51773), or the CFR test engine (DIN EN ISO 5165) is used. Due to the higher viscosity of rapeseed oil fuel, a deficient fuel injection in test engines optimised for Diesel fuel occurs, which leads to an incomplete combustion and a quick coking of the injection nozzles. An adaptation of the test engines for operating with vegetable oil is too intricate and expensive. Thus, an alternative test method for the Cetane number determination is required.

In the research project “development of a test method for Cetane number determination of rapeseed oil fuel“ supported by the Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (Bavarian Ministry for Agriculture and Forestry, BayStMLF) the suitability for a Cetane number determination of rapeseed oil with the Fuel Ignition Tester from FuelTech AS is to be tested as well as a test method is to be developed and described.

The Cetane number determination with the FIT is similar to the Diesel engine combustion process. The test fuel is injected in a heated and pressurized constant volume combustion chamber, where the self ignition and combustion takes place. The ignition delay is determined by the time between the injection and the pressure increase in the combustion chamber. By comparing the average ignition delay of several single fuel injections with the ignition delays of reference fuels of known Cetane number compiled in a reference curve, the Cetane number can be determined.

First the Cetane number determination of Diesel fuel with the FIT was optimised regarding the comparability with the test results of a conventional test engine. As basis of evaluation the guidelines for the Cetane number determination according to DIN 51773 were used.

For this purpose the number of single injections as well as the accuracy in regulating the test conditions were analysed, regarding the quality of the Cetane number determination. In the following the parameters combustion chamber temperature and combustion chamber pressure were adjusted to the optimal test conditions and the application possibility of an injection nozzle with larger injection hole diameter was checked.

In addition a software (LOK-statistic program) for the statistic outlier detection in the single injections of a Cetane number determination with the Fuel Ignition Tester was developed and tested.

The suitability of the optimised settings was checked on the basis of different rapeseed oil fuels and then assumed in a test method for the Cetane number determination of rapeseed oil fuel with the Fuel Ignition Tester.

The determined settings, which guarantee by differing from the standard settings a higher comparability and repeatability for the Cetane number determination of rapeseed oil fuel with the Fuel

Ignition Tester (FIT-1) are shown in table 15. These set-tings are considered for a Cetane number determination of Diesel and rapeseed oil fuels as well.

The test method was checked with Diesel fuels with a Cetane number range of 50 to 54 and with rapeseed oil fuels with a Cetane number range of 37 to 43.

Table 15: Optimised settings for the Cetane number determination of rapeseed oil fuel with the Fuel Ignition Tester

Parameter	Description	Setting
chamber press. ref.	combustion chamber pressure	20 bar
chamber temp. ref.	combustion chamber temperature	525 °C
fuel temp. ref.	fuel temperature	50 °C
max. fuel temp.	maximum fuel temperature	100 °C
chamber start press.	combustion chamber start pressure	15 bar
chamber press. hyst.	chamber pressure hysteresis	0,3 bar
emptying press. limit	remaining pressure in the combustion chamber	0,3 bar
max. # injections	number of injections	20
chamber trajektor gain	regulating parameter for the chamber temperature	10
injection nozzle	diameter of the injection nozzle	0,25 mm

The results of a Cetane number determination of Diesel fuel as well as rapeseed oil fuel with the FIT are within the range of the guidelines for the repeatability (R £ 1 CN) and the comparability (± 2 CN) according to DIN 51773. Deviations in the repeatability of a rapeseed oil measuring are leaded back to deposits on the injection nozzle.

Deposits on the injection nozzle occurred after two to five Cetane number determinations. Thus, the precision of measurements of the FIT should be checked before and after each Cetane number determination of rapeseed oil using a Diesel fuel with known Cetane number. If the result is not within the guidelines for the repeatability according to DIN 51773 the test result must be discarded and the injection nozzle must be checked. If there are deposits on the surface of the injection nozzle, the injection nozzle has to be cleaned or replaced.

While testing the Cetane number of rapeseed oil, the measured ignition delays have to be checked for possible outliers with the LOK-statistic program. Only the adjusted mean should be used for the further Cetane number determination. Nevertheless the tested statistic program offers a good and reliable basis for identifying possible outliers and leads in the majority of cases to an improvement for the quality of the Cetane number determination with the FIT.

The determined Cetane numbers of the 29 rapeseed oil fuel samples vary from 37 to 42. The described Cetane number in literature for rapeseed oil fuel is within the range of the ignition quality of the tested samples.

A correlation of possible interactions between the Cetane number and the peroxide value, oxidation stability or total acid number could not be asserted.

Overall the Cetane determination has several advantages compared to the test engine. Measuring the Cetane number of rapeseed oil fuel is, due to the possible de-posits on the injection nozzle, partly restricted. Thus, a need for further researches exists.

Quellenverzeichnis

- [1] ARAL (2003): Eigenschaften und Kennwerte des Dieselmotorkraftstoffs, Zündwilligkeit – Voraussetzung für das Dieselmotorkonzept. URL: <http://www.aral-forschung.de/forschung/homepage/kraftstoffe/dieselmotorkraftstoffe/physik0/zuendwilligkeit.html>
- [2] AUERBACH, U. (2003): Der Einsatz von Pflanzenölen und FAME als Dieselmotorkraftstoff – Untersuchungen zur Oxidationsstabilität und Zündeigenschaften. Diplomarbeit der Fachrichtung Chemie, Fachhochschule und Berufskolleg NTA Prof. Dr. Grübler, gemeinn. GmbH. Isny im Allgäu: Eigenverlag, 61 Seiten
- [3] BACHMAIER, M. (2003): A confidence interval without any influence of outliers. TU München. Freising: unveröffentlicht
- [4] BASSHUYSEN VAN, R.; SCHÄFER, F. (Hrsg.) (2002): Shell-Lexikon Verbrennungsmotor, Supplement von ATZ und MTZ – Folge 79. Wiesbaden: Friedrich Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH
- [5] BIRKNER, M. (1995): Untersuchungen der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Vorstellung eines neuen Pflanzenöl-Motor-Konzeptes. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenwesen. Kaiserslautern: Eigenverlag, 148 Seiten
- [6] BORN, C. (2001): Schadstoffreduzierung am DI-Dieselmotor durch Emulsionseinspritzung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Aachen: Eigenverlag, 155 Seiten
- [7] DATSCHEFSKI, G.; RICKEARD, D. J. (1993): Diesel fuel ignition quality measurement by a constant volume combustion test. SAE-Papers, Paper-Nr. 9322743, S. 1-6
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1996): DIN 51773: Prüfung flüssiger Brennstoffe - Bestimmung der Zündwilligkeit (Cetanzahl) von Dieselmotorkraftstoffen. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1999): DIN EN 590: Dieselmotorkraftstoff - Mindestanforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1999): DIN EN ISO 5165: Mineralölzeugnisse – Bestimmung der Zündwilligkeit von Dieselmotorkraftstoffen – Cetan-Verfahren mit dem CFR-Motor. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [11] FIEWEGER, K. (1996): Selbstentzündung von Kohlenwasserstoff/Luft-Gemischen unter motorischen Randbedingungen. Aachen: Shaker Verlag, 122 Seiten
- [12] FISKAA, G.; WHITE, M. (1994): A new instrument for analysing the ignition and combustion properties for fuel oils. Condition Monitoring '94, March 21-25, 1994 in Swansea, Great Britain. Swansea: Pineridge Press, S. 786-795
- [13] FUELTECH AS (2001): FIA/FIT User Manual Instrument 002.05.0601. Trondheim/Norway: Eigenverlag
- [14] HARDENBERG, H.O. (1984): Zündwilligkeit und Cetanzahl reiner Kohlenwasserstoffe. mineralöl technik, Jg. 29, Nr. 5, S. 13-25
- [15] HARDENBERG, H. O.; WAGNER, W. (1971): Der Zündverzug in direkteinspritzenden Dieselmotoren. MTZ Motortechnische Zeitung, Jg. 32, Nr. 7, S. 240-248

- [16] HEMMERLEIN, N.; KORTE, V.; RICHTER, H. (1991): Rapsöl als Kraftstoff für Dieselmotoren. In: SCHARMER, K. (Hrsg.): Biokraftstoffe für Dieselmotoren – Stand der Technik, Erfahrungen aus Versuchs- und Demonstrationsprogrammen, Zukunftsaussichten für Dieselkraftstoffe aus Pflanzenöl. Symposium Nr. 13982/68.263 Technische Akademie Esslingen. Ostfildern: Eigenverlag
- [17] HUBER, P. J. (1973): Robust Regression – Asymptotics, Conjectures and Monte Carlo. The Annals of Statistics, Jg. 1, S. 799-821
- [18] HUBER, P. J. (1977): Robust statistical procedures, Regional Conference Series in Applied Mathematics 27. Philadelphia/Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics, 67 Seiten
- [19] HUBER, P. J. (1981): Robust Statistics. New York: John Wiley & Sons, 320 Seiten
- [20] MOLLENHAUER, K. (1997): Handbuch – Dieselmotoren. Berlin: Springer Verlag, 1029 Seiten
- [21] PISCHINGER, F. et al. (2001): Abschlussbericht Sonderforschungsbereich 224 “Motorische Verbrennung”. RWTH (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule), Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, 726 S.
URL: http://www.vka.rwth-aachen.de/sfb_224/bericht.htm, (726 Seiten)
- [22] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff – Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München. Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, Nr. 400, 194 Seiten
- [23] REMMELE, E.; THUNEKE, K.; WIDMANN, B.; WILHARM, T.; SCHÖN, H. (2000): Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW - „Gelbes Heft 69“. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Eigenverlag, 217 Seiten
- [24] TAKEDA, A.; SHIODE, K.; FISKAA, G. (2001): Ignition and combustion qualities are very important for engine performance and reliability. 23rd World Congress on Combustion Engine Technology for Ship Propulsion, Power Generation, Rail Traction, May 7-10, 2001 in Hamburg, Band 3. Frankfurt: CIMAC, S. 1089-1100
- [25] WARNATZ, J.; MAAS, U.; DIBBLE, R. W. (2001): Verbrennung – Physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffstehung. Berlin: Springer Verlag, 326 Seiten
- [26] WIDMANN, B.A.; APFELBECK, R.; GESSNER, B. H.; PONTIUS, P. (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht – „Gelbes Heft Nr. 40“ (Gesamtbericht), München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Eigenverlag, 650 Seiten

Berichte im Rahmen dieser Schriftenreihe

Berichte aus dem TFZ:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff

