



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**

**DIPLOMARBEIT**

**Bestimmung der Vorentflammungskennzahl CPI von Ottokraftstoffen und  
Korrelation mit Ergebnissen von Vorentflammungsuntersuchungen  
an einem Serienmotor**

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

**Univ. Prof. Dr.techn. Bernhard Geringer**

und

**Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Graf**

**E315**

**Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Bernhard Makovicka**

**01325865**

## Diplomaufgabe

Herrn **Bernhard MAKOVICKA**, Matrikelnummer: 01325865, Kennzahl: 066 482, wird folgende Diplomaufgabe gestellt:

### **Bestimmung der Vorentflammungskennzahl CPI von Ottokraftstoffen und Korrelation mit Ergebnissen von Vorentflammungsuntersuchungen an einem Serienmotor**

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

1. Literaturrecherche: Anforderungen für ottomotorische Kraftstoffe allgemein, Verbrennungsanomalien, genormte Prüfverfahren zur Bestimmung der Klopf-festigkeit, neu entwickelte Prüfverfahren zur Beurteilung des Vorentflam-mungsverhaltens. Es ist eine weltweite Recherche aus anerkannten Daten-banken vorzunehmen (insbesondere auch USA und Asien).
2. Messungen von Ottokraftstoffen am CFR-Prüfmotor: Neben den genormten Klopfkennzahlen ROZ und MOZ soll auch die Messung der neu entwickelten Vorentflammungskennzahl CPI am modifizierten CFR-Prüfmotor, entspre-chend der bereits festgelegten Prüfvorschrift, durchgeführt werden.
3. Vorentflammungsuntersuchungen an einem hochaufgeladenen Downsizing-Motor: In mehreren Motorbetriebspunkten sollen durch kritische Betriebszu-stände (erhöhter Ladedruck, erhöhte Ladelufttemperatur) irreguläre Verbren-nungsvorgänge provoziert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lie-fern eine Bewertung der Ottokraftstoffe hinsichtlich ihres Vorentflammungsver-haltens in einem modernen Downsizing-Motor.
4. Korrelation der Vorentflammungskennzahl mit den Ergebnissen am Serienmo-tor: Die Güte eines Prüfverfahrens zeichnet sich neben hoher Präzision auch durch gute Korrelation zu den Ergebnissen an einem realen Serienmotor aus. Da auch an anderen Standorten mit diesen Kraftstoffen Vorentflammungsun-tersuchungen durchgeführt werden, sollen auch diese Messdaten bei der Kor-relationsanalyse mitberücksichtigt werden. Auswirkungen von veränderten Umgebungs- bzw. Betriebsbedingungen auf das Ergebnis des CPI-Prüfverfah-rens sollen ebenfalls ermittelt werden.

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

Die Diplomarbeit soll Anfang August 2021 beginnen und ist bis Ende März 2022 zu beenden.

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

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

Einverstanden:

Betreuer am Institut

\_\_\_\_\_  
Bernhard Makovicka

\_\_\_\_\_  
Dr. techn. Josef Graf

Betreuender Professor:

Institutsvorstand

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Bernhard Geringer

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Bernhard Geringer

## Eidesstattliche Erklärung

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

### **Bestimmung der Vorentflammungskennzahl CPI von Ottokraftstoffen und Korrelation mit Ergebnissen von Vorentflammungsuntersuchungen an einem Serienmotor**

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

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

Datum

Unterschrift

#### Sperrvermerk:

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

## Kurzfassung

Der kontinuierlich anhaltende Trend der letzten Dekade hin zu modernen effizienten Verbrennungsmotoren, auch bekannt als Downsizing-Motoren, erfordert durch die Begünstigung irregulärer Verbrennungsphänomene ein enormes Know-how der Entwicklung. Da das Auftreten von Verbrennungsanomalien jeglicher Art (Klopfen, Vorentflammung) ein erhebliches Schadenspotential birgt, rückt überdies zunehmend der Kraftstoff weiter in den Fokus der Forschungsaktivitäten. Die ursprünglich zur Bewertung der Klopfestigkeit eingeführte Oktanzahl kann den Einfluss der Kraftstoffe auf das Selbstzündungsverhalten insbesondere bei modernen Motoren und hohen Anteilen an Oxygenaten im Kraftstoff, nur unzureichend abbilden. Dieser Tatsache geschuldet wurde von Martin et al. [1] am IFA der TU Wien eine neue Prüfmethode an einem modifizierten CFR-Forschungsmotor (Cooperative Fuel Research) zur Klassifizierung von sauerstoffhaltigen Kraftstoffen in Bezug auf deren Vorentflammungsverhalten entwickelt. Zur Quantifizierung der Kraftstoffe dient die in diesem Zusammenhang neu eingeführte Compression Pre-Ignition Kennzahl (CPI). Ein 2019 gegründeter internationaler Arbeitskreis bestehend aus Mitgliedern der Kraftstoff- und Fahrzeugindustrie, Prüfverfahrensentwickler, Vertreter der Normungsinstitute und Forschungsstellen verfolgt das primäre Ziel der Etablierung der CPI-Kennzahl in der Kraftstoffnorm. Die Intention der vorliegenden Diplomarbeit liegt in der Bestimmung der Vorentflammungskennzahl (CPI) von marktkonformen Ottokraftstoffen und anschließender Korrelationsanalyse mit Untersuchungen an einem Serienmotor. Ferner werden die verwendeten Kraftstoffproben hinsichtlich ihrer Zündverzugszeit an einer Konstantvolumenbrennkammer untersucht um aufbauend darauf die Constant Volume Pre-Ignition Kennzahl (CVPI) zu ermitteln.

Die Resultate des C(V)PI-Messverfahrens weisen eine hohe Korrelation zu den Ergebnissen am Serienmotor auf. Zudem stellt die Research-Oktanzahl (ROZ) aufgrund der geringen Anteile an Oxygenaten ein gutes Maß zur Selbstzündungscharakteristik der Kraftstoffe dar. Lediglich die Motor-Oktanzahl (MOZ) bildet das Vorentflammungsverhalten der untersuchten Proben nur unzureichend ab. Ferner kann festgehalten werden, dass die In-Zylinder-Bedingungen des CFR-Prüfmotors von denen des Serienmotors abweichen. Hinsichtlich des Prüfverfahrens zur Bestimmung der CPI-Kennzahl können sich somit unter Berücksichtigung bestimmter Kraftstoffanteile Einschränkungen bei der Bewertung des Vorentflammungsverhaltens ergeben. Dies wird in zukünftigen Forschungsarbeiten eine der wichtigsten Herausforderungen darstellen. Zudem konnten die Prüfparameter des Versuchsträgers zur Ermittlung der CVPI-Kennzahl bisher noch nicht eindeutig spezifiziert werden, diese stellen somit ebenso neue Untersuchungsgrundlagen für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten dar.

## Abstract

The continuing trend of the last decade towards modern efficient combustion engines, also known as downsizing engines, requires enormous development know-how due to the favoring of irregular combustion phenomena. Since the occurrence of combustion anomalies of any kind (knocking, pre-ignition) carries a considerable potential for damage, fuel is also increasingly moving further into the focus of research activities. The octane number originally introduced to evaluate knock resistance cannot adequately reflect the influence of fuels on auto-ignition behaviour, especially in modern engines and with high proportions of oxygenates in the fuel. Due to this fact, Martin et al. [1] at the IFA of the TU Vienna developed a new test method on a modified CFR research engine (Cooperative Fuel Research) for the classification of oxygenated fuels with respect to their pre-ignition behaviour. The Compression Pre-Ignition Index (CPI), newly introduced in this context, is used to quantify the fuels. An international working group established in 2019 consisting of members from the fuel and vehicle industry, test method developers, representatives of standards institutes and research institutions is pursuing the primary goal of establishing the CPI-index in the fuel standard. The declared aim of this master thesis is to determine the pre-ignition index (CPI) of market conformity gasoline fuels and afterwards analyse the correlation with tests on a series engine. Furthermore, the fuel samples used are examined to measure their ignition delay time in a constant volume combustion chamber to be able to determine the constant volume pre-ignition index (CVPI).

The results of the C(V)PI measurement method show a high correlation to the results on the series engine. Likewise, the research octane number (RON) can provide a good estimate of the auto-ignition characteristics of the fuels due to the low proportions of oxygenates. Only the motor octane number (MOZ) does not adequately represent the pre-ignition behavior of the samples investigated. It can also be noted that the in-cylinder conditions of the CFR test engine differ from those of the series engine. With regard to the test procedure for determining the CPI index, limitations may therefore arise in the evaluation of the preignition behavior when certain fuel components are taken into account. This will be one of the most important challenges in future research work. In addition, the test parameters of the test vehicle for determining the CVPI have not yet been clearly specified and therefore also represent a motivation for further investigations.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract .....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen (Oxidation).....	3
2.2 Downsizing .....	6
2.3 Verbrennungsanomalien .....	8
2.3.1 Klopfende Verbrennung .....	9
2.3.2 Vorentflammung.....	11
2.4 Kraftstoffe .....	17
2.4.1 Bestandteile und Anforderungen herkömmlicher Kraftstoffe .....	17
2.4.2 Zukünftige Kraftstoffe .....	23
3 Auswahl der Kraftstoffe .....	25
4 Methodik.....	28
4.1 CFR-Prüfmotor .....	28
4.2 Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer.....	34

4.3	Serienmotor .....	38
5	Ergebnisse und Diskussion .....	44
5.1	CFR-Prüfmotor .....	44
5.2	Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer .....	48
5.3	Serienmotor .....	49
6	Validierung der Messmethodik .....	59
6.1	Untersuchung des CPI-Messverfahrens .....	59
6.2	Thermodynamische Randbedingungen im Zylinder .....	66
7	Zusammenfassung .....	70
8	Literaturverzeichnis .....	73



## Abkürzungsverzeichnis

A	Stoßfaktor
AFIDA	Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer
AON	Average Octane Number
BP	Betriebspunkt
C	Kohlenstoff
CFR	Cooperative Fuel Research
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPI	Compression Pre-Ignition
CVPI	Constant Volume Pre-Ignition
DCR	Digital Counter Reading
DE	Direkteinspritzung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Drosselklappe
DOZ	direkteinspritzende Oktanzahl
E <sub>a</sub>	Aktivierungsenergie
E <sub>i</sub>	Störgröße
EN	Europäische Norm
ETBE	Ethyltertiärbutylether
f	Bauartfaktor
FBP	Final Boiling Point
FCS	Fuel Classification System
FOZ	Front-Oktanzahl
H	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HSPI	Hot Spot Pre-Ignition
IFA	Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
ISO	Internationale Organisation für Normung
k <sub>r</sub>	Geschwindigkeitskonstante der Reaktion
KW	Kurbelwinkel
LMM	Luftmassenmesser
LSPI	Low Speed Pre-Ignition
LWOT	Ladungswechsel-OT
MFB05%	Brennbeginn
MFB50%	Umsatzschwerpunktslage

MOZ	Motor-Oktanzahl
MTBE	Methyltertiärbutylether
n	Drehzahl
NTK	Niedertemperaturkoeffizient
O	Sauerstoff
OT	oberer Totpunkt
p	Druck
P	Leistung
PtG	Power-to-Gas
R	universelle Gaskonstante
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
ROZ	Research-Oktanzahl
S	Sensitivität
SOZ	Straßenoktanzahl
T	Temperatur
t	Zeit
TU	Technische Universität
V	Volumen
VE	Vorentflammung
X	Einflussgröße (unabhängige Variable)
Y	Zielgröße (abhängige Variable)
ZOT	Zünd-OT
ZZP	Zündzeitpunkt
$\alpha, \beta$	unbekannte skalare Parameter
$\Gamma$	Zündverzugsanteil
$\Delta H_R$	Reaktionsenthalpie
$\varepsilon$	geometrisches Verdichtungsverhältnis
$\lambda$	Luft-Kraftstoff-Verhältnis
$\mu$	Mittelwert
$\sigma$	Standardabweichung

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zündverzugszeiten für ein Gemisch aus n-Heptan und Luft, [4]; [9] .....	4
Abbildung 2: Zündverzugszeiten für ein Gemisch aus Isooktan und Luft bei unterschiedlichen Druckbedingungen, [4]; [10].....	5
Abbildung 3: Entwicklung der Leistungsdichte von Ottomotoren seit 1990, [12].....	7
Abbildung 4: Unterteilung irregulärer Verbrennungsvorgänge im Betriebskennfeld, [13] .....	8
Abbildung 5: Schema einer klopfenden Verbrennung, [7] .....	9
Abbildung 6: Druckverläufe im Zylinder, [16] .....	11
Abbildung 7: Möglichkeiten zur Verursachung einer Vorentflammung, [25] .....	12
Abbildung 8: Unterscheidung der Verbrennungsanomalien anhand der Zündunwilligkeit, [42] .....	14
Abbildung 9: selbsterhaltende Charakteristik von Glühzündungen, [46].....	16
Abbildung 10: Strukturformeln der aliphatischen Kohlenwasserstoffverbindungen, [6] .....	19
Abbildung 11: Strukturformeln der Aromatenverbindungen, [6].....	20
Abbildung 12: Strukturformeln der sauerstoffhaltigen Verbindungen, [6].....	21
Abbildung 13: schematische Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs und Gewinnung von Wasserstoff zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, [3] .....	23
Abbildung 14: Visualisierung der Kraftstoffproben .....	25
Abbildung 15: Siedeverlauf der verwendeten marktkonformen Kraftstoffproben .....	27
Abbildung 16: Schnittdarstellung des modifizierten CFR-Motors, [4] .....	30
Abbildung 17: modifizierter CFR-Motor inkl. FCS-System .....	30
Abbildung 18: integrierter Kompressor im FCS-System .....	31
Abbildung 19: Schematischer Aufbau des AFIDA, [4] .....	34

Abbildung 20: AFIDA Gerät, [63] .....	35
Abbildung 21: Kammerdruckverlauf gemessen am AFIDA, [4].....	37
Abbildung 22: Druckverlauf am Serienmotor zur Verdeutlichung des Abschaltmechanismus.....	39
Abbildung 23: Prüfzelle am IFA der TU Wien .....	40
Abbildung 24: Schematischer Aufbau des Prüfstands.....	41
Abbildung 25: Kraftstoffbewertung anhand der Research- und Motor-Oktananzahl (ROZ/MOZ).....	45
Abbildung 26: Kraftstoffbewertung anhand der Sensitivität (ROZ-MOZ) .....	45
Abbildung 27: Kraftstoffbewertung anhand der Compression Pre-Ignition Kennzahl (CPI) .....	46
Abbildung 28: Kraftstoffbewertung anhand der Constant Volume Pre-Ignition Kennzahl (CVPI).....	48
Abbildung 29: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 1 .....	49
Abbildung 30: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 2.....	50
Abbildung 31: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 3.....	50
Abbildung 32: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der Research-Oktananzahl .....	53
Abbildung 33: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der Motor-Oktananzahl .....	53
Abbildung 34: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der CPI-Kennzahl (IFA).....	55
Abbildung 35: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der CPI-Kennzahl (MIBÖ).....	55
Abbildung 36: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der CVPI-Kennzahl.....	56

Abbildung 37: Kolbenschaden am Serienmotor.....	58
Abbildung 38: Zusammenhang des Verdichtungsverhältnis und der DCR-Anzeige am CFR-Motor.....	60
Abbildung 39: Absaugung des Abgasstromes des CFR-Prüfmotors am IFA der TU Wien (minimaler Gegendruck).....	62
Abbildung 40: Lochblende zur Erhöhung des Abgasgegendrucks am CFR-Prüfmotor .....	62
Abbildung 41: DCR-Werte eines Referenz- und Probenkraftstoffes einer statistischen Messreihe am CFR-Prüfmotor nach der CPI-Messmethode .....	64
Abbildung 42: In-Zylinder-Bedingungen der verwendeten Versuchsträger bzw. Methoden.....	66
Abbildung 43: In-Zylinder-Druckverlauf mit Probenkraftstoff PR8572 und den in Kapitel 4 definierten Motorbetriebsbedingungen am Serienmotor (Betriebspunkt 3) und am CFR-Prüfmotor (CPI).....	67
Abbildung 44: In-Zylinder-Temperaturverlauf mit Probenkraftstoff PR8572 und den in Kapitel 4 definierten Motorbetriebsbedingungen am Serienmotor (Betriebspunkt 3) und am CFR-Prüfmotor (CPI).....	68
Abbildung 45: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 1 inklusive Isooktan (2,2,4-Trimethylpentan).....	69

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teilauszug aus der Kraftstoffnorm DIN EN 228 zur Definition der Anforderungen für unverbleiten Ottokraftstoff Super/Super Plus (E5), [5] .....	22
Tabelle 2: Auszug aus dem Testreport der Kraftstoffanalyse (chemische Bestandteile der Kraftstoffproben).....	26
Tabelle 3: Betriebsbedingungen der ROZ/MOZ-Kraftstoffprüfung abgeleitet aus der Prüfanweisung DIN EN-ISO 5163 (5164), [58]; [59] .....	28
Tabelle 4: Betriebsbedingungen der CPI-Kraftstoffprüfung den Bedingungen der etablierten ROZ/MOZ-Kraftstoffprüfung gegenübergestellt, [58]; [59]; [61] .....	33
Tabelle 5: Betriebsbedingungen der CVPI-Kraftstoffprüfung, [4].....	36
Tabelle 6: Technische Spezifikationen des Serienmotors .....	38
Tabelle 7: Messtechnik am Serienmotor.....	41
Tabelle 8: statische Betriebsparameter der Untersuchungen am Serienmotor.....	42
Tabelle 9: Betriebspunkte der Untersuchungen am Serienmotor .....	42
Tabelle 10: Messtoleranzen der untersuchten Kraftstoffproben am CPI-Messverfahren .....	47
Tabelle 11: Wertebereich und zugehörige Differenz der ermittelten Kraftstoffkennzahlen (ROZ/MOZ/CPI) am CFR-Forschungsmotor.....	47
Tabelle 12: Grenzbedingungen der Vorentflammungsuntersuchungen am Serienmotor (kritische Ladelufttemperatur, kritischer Ladedruck) .....	57
Tabelle 13: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der Kraftstoffkennzahlen der unterschiedlichen Prüfverfahren am CFR-Prüfmotor sowie am AFIDA.....	57
Tabelle 14: Auswirkungen der Ergebnisse am CFR-Motor hinsichtlich einer Variation der Luftfeuchtigkeit im Ansaugtrakt .....	59
Tabelle 15: Messresultate am CFR-Prüfmotor mit falsch eingestellter Zylinderhöhe	61

Tabelle 16: Auswirkungen der Ergebnisse am CFR-Motor hinsichtlich einer Variation des Auspuffgedrucks .....	63
Tabelle 17: Zusammenfassung der Einflussnahme aufgrund veränderter Prüfparameter am CFR-Forschungsmotor .....	63
Tabelle 18: statistische Kennzahlen bei Durchführung einer Messreihe .....	65
Tabelle 19: Korrelationsanalyse der Ergebnisse hinsichtlich der Vorentflammungsuntersuchungen am Serienmotor und der ermittelten Kraftstoffkennzahlen am CFR-Motor sowie AFIDA.....	71

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Um dem stetigen Anstieg des globalen Energiebedarfes und dem damit verbundenen weiter voranschreitenden Klimawandel entgegenwirken zu können, werden vom Gesetzgeber – insbesondere im Transportsektor – immer schärfere Restriktionen auf den Weg gebracht. Die ambitionierten Ziele der Regierungsgewalt, beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Flottenverbrauch von Neufahrzeugen, stellen die Fahrzeugentwickler vor neuen Herausforderungen. Ferner spielen die Anforderungen der Verbraucher eine zentrale Rolle. Resultierend daraus gewinnt der Terminus Downsizing immer mehr an Bedeutung. Moderne, effiziente Verbrennungsmotoren werden als Downsizing-Motoren bezeichnet, wenn diese trotz reduziertem Hubraum durch Aufladung eine unveränderte Antriebsleistung erreichen. Die gesteigerte Leistungsdichte kann jedoch zu kritischen Betriebszuständen während des Verbrennungsprozesses führen und dadurch sogenannte Verbrennungsanomalien begünstigen. Zur Vermeidung dieser irregulären Verbrennungsabfolgen sowie zur Erreichung weiterer Verbrauchseinsparung geraten neben motorischen Maßnahmen auch moderne Kraftstoffe mit teils höheren Anteilen an sauerstoffhaltigen Verbindungen immer weiter in den Fokus der Entwicklungen. Die wohl bekannteste irreguläre Verbrennung ist die klopfende Verbrennung und die damit in Verbindung stehende Oktanzahl, welche ein Maß für die Klopfestigkeit des Kraftstoffes darstellt. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die heute genormten Oktanzahlen, Research-Oktanzahl (ROZ) und Motor-Oktanzahl (MOZ) unter Verwendung moderner Motoren weder das Klopfverhalten noch andere Verbrennungsanomalien wie beispielsweise die Vorentflammungen hinreichend quantifizieren können. Bei der Betrachtung von Vorentflammungen wurde ersichtlich, dass diese aufgrund von extremen Druckgradienten ein hohes Gefahrenpotenzial für Motorschäden mit sich bringen und deshalb einen bestimmenden Faktor bei der Motordimensionierung vorgeben. [1]; [2]; [3]

Aufgrund der unzureichenden Quantifizierung von Ottokraftstoffen mit den bestehenden Kraftstoffkennzahlen wurden hierfür neuartige Prüfverfahren entwickelt. Einerseits sind dies die Messverfahren an einem modifizierten CFR-Motor (Cooperative Fuel Research) mit der Bestimmung der DOZ (direkteinspritzende Oktanzahl), der CPI-Kennzahl (Compression Pre-Ignition) und der HSPI-Kennzahl (Hot Spot Pre-Ignition) und andererseits die Prüfung in einer Konstantvolumenbrennkammer namens AFIDA (Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer) zur Determinierung der CVPI-Kennzahl (Constant Volume Pre-Ignition). Die CPI beziehungsweise die CVPI-Kennzahl von Kraftstoffen stehen in Relation zu Vorentflammungen, die aus der Gasphase



entstehen, die HSPI-Kennzahl ist ein Maß zur Beschreibung der Vorentflammungsneigung, sollten diese durch heiße Stellen im Brennraum hervorgerufen werden. Letztere werden auch als Glühzündung bezeichnet. Durch die ständige Weiterentwicklung dieser Verfahren seit vielen Jahren haben zur Betrachtung der gasphaseninduzierten Vorentflammungen die Ergebnisse der C(V)PI-Kennzahlen bereits vielversprechende Ergebnisse auf Basis alkoholischer Kraftstoffe dargebracht. Diese Messreihen haben ein breites Spektrum an unterschiedlichen Kraftstoffkomponenten beinhaltet und vor allem die Auswirkungen von sauerstoffhaltigen Verbindungen auf die gasphaseninduzierte Vorentflammung untersucht. Das Vorentflammungsverhalten von marktüblichen Ottokraftstoffen und die Etablierung dieser CPI-Kennzahl in der Kraftstoffnorm sind die Schwerpunkte eines 2019 gestarteten internationalen Arbeitskreises „NAK Gas Phase Pre-Ignition Number“ mit Mitgliedern aus der Kraftstoff- und Fahrzeugindustrie, Prüfverfahrensentwicklern, Vertretern der Normungsinstitute (DIN) und Forschungsstellen. Die Mitwirkung des IFA in diesem Arbeitskreis gekoppelt mit Untersuchungen zur Präzision und Automation des Prüfverfahrens für eine nutzerfreundliche Anwendung sind auch Forschungsinhalte in dieser Diplomarbeit. [1]; [4]; [5]

## 1.2 Zielsetzung

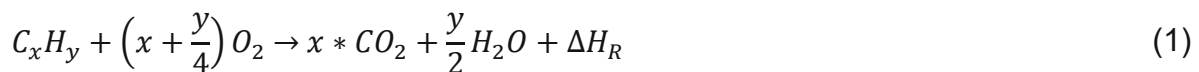
Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Aussagekraft der vorangehenden Untersuchungen bezüglich der neuentwickelten Kraftstoffkennzahlen zu stärken und diese bezüglich marktrelevanter Ottokraftstoffe auf Belastbarkeit zu überprüfen. Zur Validierung wird eine Auswahl an fünf derzeit marktüblichen Ottokraftstoffen nach DIN EN 228 herangezogen, um damit experimentelle Versuche durchzuführen. Diese Versuche gliedern sich einerseits in die Versuchsreihen an dem modifizierten direkteinspritzenden CFR-Motor zur Bestimmung der Vorentflammungskennzahl CPI und andererseits in Vorentflammungsuntersuchungen an einem Dreizylinder-Serienmotor unter verschiedenen Betriebspunkten. Zusätzlich werden die Ergebnisse einer Messung mittels des AFIDA in die Diskussion miteinbezogen. Auf Grundlage der gewonnenen Daten dieses Vorhabens ist es bei zufriedenstellenden Ergebnissen möglich, ein automatisiertes Messverfahren zur Charakterisierung von Kraftstoffen zur Verfügung stellen zu können. Darüber hinaus ist es möglich weitere Anpassungen und Optimierungen in den potenziellen Messverfahren vornehmen zu können. [5]

Um ein besseres Verständnis für den Verbrennungsablauf insbesondere für die Verbrennungsanomalien bei Ottomotoren und den Einfluss verschiedener Kraftstoffkomponenten auf die Reaktivität des Kraftstoffes zu erlangen, werden vorab die Grundlagen dazu erläutert.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen (Oxidation)

Grundsätzlich wird eine Entflammung des Gemisches im Brennraum eines Ottomotors durch elektrische Energie hervorgerufen. Diese Form der elektrischen Energie wird durch eine Zündanlage erzeugt und mittels einer Zündkerze im Brennraum bereitgestellt. Unter der Voraussetzung stabiler Bedingungen im Zylinder, welche eine Entflammung zulassen, entsteht im Bereich der Zündkerze eine Flammenfront, die sich abhängig von der Zylinderinnenströmung ausbreitet. Sind die Voraussetzungen einer regulären Entflammung nicht oder nur teilweise vorhanden, ist hingegen die Möglichkeit einer Selbstzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches gegeben. Unabhängig davon, ob eine Verbrennung der Zylinderladung regulär oder irregulär stattfindet, wird diese durch die Reaktionskinetik der Kohlenwasserstoffe des verwendeten Kraftstoffes beeinflusst. Bei einer vollständigen (idealen) Verbrennung werden Kohlenwasserstoffe (Edukt) ausschließlich in Kohlendioxid und Wasser (Produkte) umgewandelt. Diese Form der Umwandlung kann durch die Bruttoreaktionsgleichung (Gleichung (1)) mit den bekannten chemischen Elementen und der Reaktionsenthalpie  $\Delta H_R$  beschrieben werden. [6]



Eine reale Verbrennung weicht jedoch von diesem einfachen Schema ab und beruht stattdessen auf einem komplexen Vorgang, der aus einer Menge an Elementarreaktionen besteht. Die einzelnen Elementarreaktionen werden wiederum durch die Reaktionskinetik beeinflusst und unterscheiden sich untereinander in der Reaktionsgeschwindigkeit. Die Reaktionsgeschwindigkeit liefert Informationen über den zeitlichen Verlauf einer Reaktion und ist unter anderem von der Gastemperatur, der Aktivierungsenergie und der Konzentration der Edukte abhängig. Beschrieben werden kann dies durch den Arrhenius-Ansatz in Gleichung (2). [7]; [8]

$$k_r = A * e^{-\frac{E_a}{R*T}} \quad (2)$$

$k_r$	Geschwindigkeitskonstante der Reaktion
$A$	Stoßfaktor
$E_a$	Aktivierungsenergie
$R$	universelle Gaskonstante
$T$	Systemtemperatur

Zur weiteren Betrachtung der Reaktionspfade ist die Aktivierungsenergie von Bedeutung. Diese stellt eine Temperaturschwelle dar, dessen Überschreitung sinngemäß den Reaktionsbeginn bedeutet. Wird nun Gleichung (2) herangezogen, so stellt man fest, dass ein Zusammenhang zwischen der Aktivierungsenergie und der Systemtemperatur besteht. Anhand dieser Beziehung wird die Oxidation von Kohlenwasserstoffen üblicherweise in zwei Temperaturregionen unterteilt, und zwar einerseits in den Niedertemperaturbereich und andererseits in den Hochtemperaturbereich. Zur besseren Veranschaulichung wird ein dritter Bereich – der Intermediärbereich – zwischen den beiden vorhin genannten definiert. [4]

Versuche von Curran et al. mit einem stöchiometrischen n-Heptan-Luft-Gemisch wurden durchgeführt, um die Zündverzugszeit der Systemtemperatur gegenüberstellen zu können. Die Zündverzugszeit kann als Geschwindigkeit der Reaktion betrachtet werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 1 dargestellt. [9]

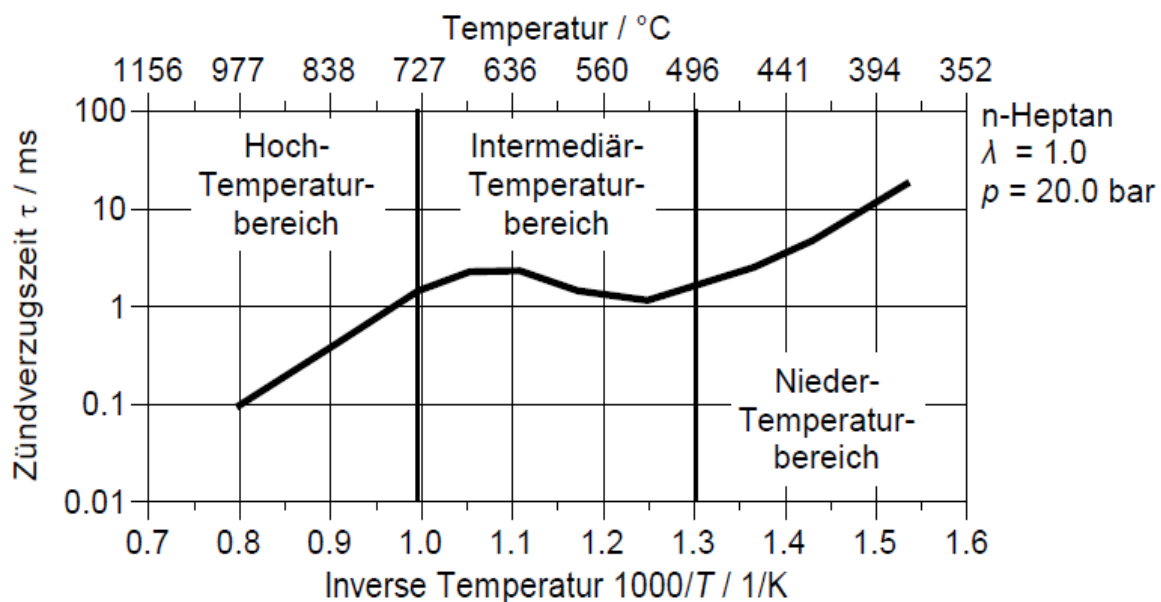


Abbildung 1: Zündverzugszeiten für ein Gemisch aus n-Heptan und Luft, [4]; [9]

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, verhält sich die Zündverzugszeit im Hoch- und Niedertemperaturbereich entsprechend dem Arrhenius-Ansatz. Eine exponentielle Abnahme der Zündverzugszeit mit steigender Systemtemperatur ist zu beobachten. In Teilbereichen des Intermediärbereiches nimmt die Zündverzugszeit jedoch zu. Dieses Verhalten kann folglich nicht länger mit dem Arrhenius-Ansatz beschrieben werden, sondern wird aufgrund der gegensätzlichen Temperaturabhängigkeit als NTK-Verhalten (Niedertemperaturkoeffizient) und kann entsprechend der chemischen Kraftstoffzusammensetzung sowie dem Systemdruck unterschiedlich stark auftreten. [4]

Zusätzlich wurde in [10] neben der Temperaturabhängigkeit der Zündverzugszeit auch eine Relation des vorherrschenden Druckniveaus und der Zündverzugszeit

festgestellt. Eine ausgeprägte NTK-Charakteristik wird demnach durch erhöhten Druck reduziert beziehungsweise gänzlich durch eine Reaktionskinetik nach dem Arrhenius-Ansatz verdrängt. Abbildung 2 zeigt den Druckeinfluss auf das Selbstzündungsverhalten. [4]; [10]

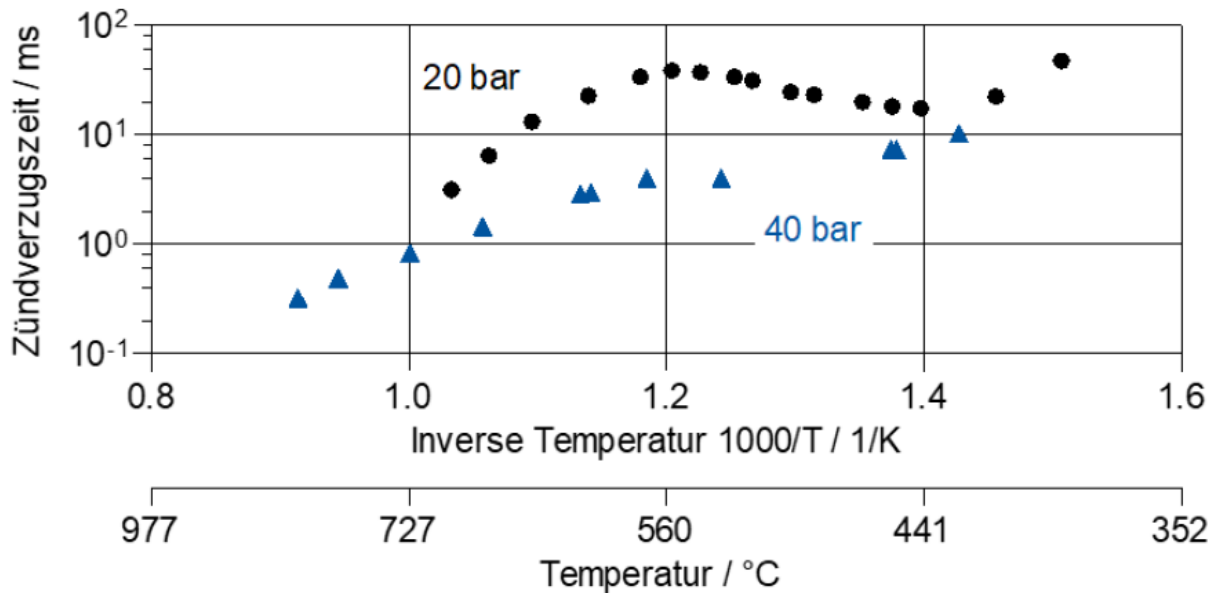


Abbildung 2: Zündverzugszeiten für ein Gemisch aus Isooktan und Luft bei unterschiedlichen Druckbedingungen, [4]; [10]

## 2.2 Downsizing

Da der Begriff des Downsizings, verbunden mit modernen Verbrennungsmotoren, immer öfter verwendet wird, sollte auch dessen Bedeutung kurz erläutert werden. Grundlegend ist unter Downsizing eines Motors die Verkleinerung des Hubvolumens zu verstehen. Vielmehr ist es jedoch eine Kombination unterschiedlicher Optimierungsansätze. Diese Ansätze können unterteilt werden in statisches und dynamisches Downsizing. Dem statischen Downsizing zuzuordnen ist die Reduzierung des Motorhubvolumens und demzufolge eine Mitteldrucksteigerung, wohingegen die Zylinderabschaltung ein Beispiel für das dynamische Downsizing darstellt. Erreichbar werden diese Downsizing-Konzepte durch Aufladung, angepasste Ventilsteuerung und Gemischaufbereitung mit dem einheitlichen Ziel der Verbrauchsreduzierung. Als Strategie wird zwischen zwei Ansätzen unterschieden, und zwar einer Verschiebung des Betriebspunktes im Motorkennfeld zu höheren Lasten (Hochlastkonzept) oder zu höheren Drehzahlen (Hochdrehzahlkonzept). Mithilfe der Formel zur Berechnung der Motorleistung (Gleichung (3)) kann dies verdeutlicht werden. Bei beiden Konzepten gilt es zu beachten die Leistungsausbeute der Kraftmaschine jedenfalls nicht zu verringern, um somit den Wirkungsgrad nachhaltig steigern zu können. [6]; [11]

$$P_{(e,i)} = \frac{n * p_{m(e,i)} * V_H}{f} \quad (3)$$

$P_{(e,i)}$	effektive/indizierte Leistung
$n$	Drehzahl
$p_{m(e,i)}$	effektiver/indizierter Mitteldruck
$V_H$	Hubvolumen
$f$	Bauartfaktor (1 für 2-Takt, 2 für 4-Takt)

Inwiefern sich die Leistungsausbeute bei Ottomotoren in den letzten 30 Jahren entwickelt hat, wird in Abbildung 3 anschaulich dargestellt.

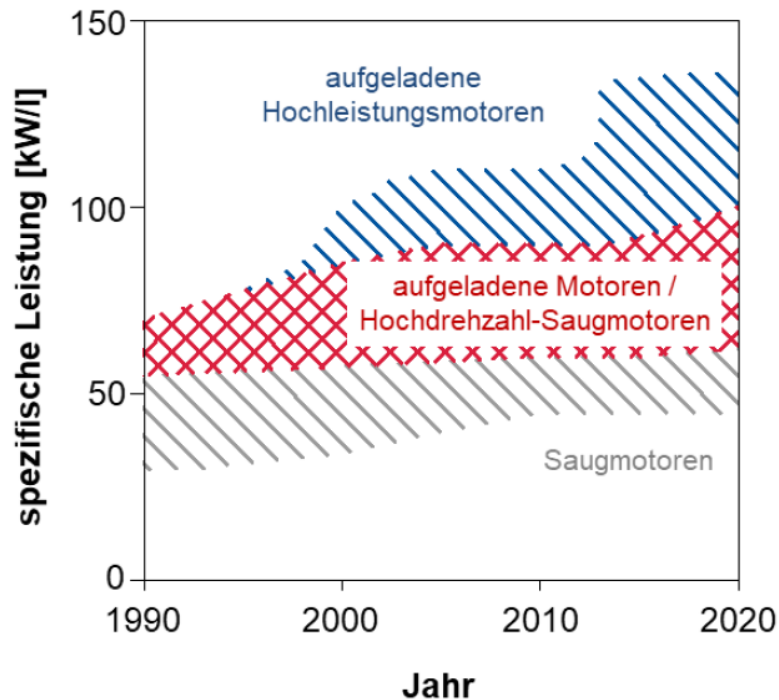


Abbildung 3: Entwicklung der Leistungsdichte von Ottomotoren seit 1990, [12]

Durch die meist (zu) hohen Drehzahlen beim Hochdrehzahlkonzept, wirken sich steigende mechanische Verluste negativ auf den Verbrauch aus, wodurch das Downsizing aktuell meist durch Hochlastkonzepte umgesetzt wird. Beim Dieselmotor lässt sich Downsizing, bedingt durch das Brennverfahren, ohnehin nur das Hochlastkonzept realisieren. Durch das Downsizing und insbesondere durch die Aufladung ergeben sich jedoch auch technische (und betriebswirtschaftliche) Problembereiche. Zu diesen Problemen zählt auch die erhöhte mechanische und thermische Belastung sämtlicher Bauteile des Verbrennungsmotors und das damit steigende Risiko von Verbrennungsanomalien. Dadurch stellt die Klopfproblematik sowie die Gefahr der Vorentflammung einen maßgebenden Faktor bei der Auslegung eines Downsizing-Konzeptes dar. Ferner sei noch erwähnt, dass gesetzlich festgelegte Schadstoffemissionen meist durch motorische Maßnahmen erreicht werden, die wiederum einer Steigerung des Wirkungsgrades entgegenwirken. [11]

## 2.3 Verbrennungsanomalien

Wie in Kapitel 2.2 bereits erwähnt, steigt die Gefahr der Entstehung von Verbrennungsanomalien durch Maßnahmen des Downsizings. Irreguläre Verbrennungsphänomene besitzen demnach eine Vielzahl unterschiedlicher Triebkräfte, werden jedoch allesamt nicht (ausschließlich) durch die Zündenergie der Zündkerze im Ottomotor ausgelöst, sondern zeitlich unabhängig davon. Eine Unterteilung kann hinsichtlich des Entstehungszeitpunktes (vor beziehungsweise nach dem regulären Zündzeitpunkt) erfolgen, wobei Vorentflammungen zu den erstgenannten und klopfende Verbrennungsvorgänge zu den Verbrennungsanomalien zählen, welche nach dem regulären Zündfunken auftreten können. Ferner ist ebenso eine Gliederung nach der Auftrittshäufigkeit im Betriebskennfeld möglich (siehe [Abbildung 4](#)). Im Folgenden werden die Verbrennungsanomalien detailliert erläutert, wobei das Hauptaugenmerk dieser Diplomarbeit die reaktionskinetischen Vorentflammungen im niedrigen Drehzahlbereich (LSPI – Low Speed Pre-Ignition) darstellen. [13]

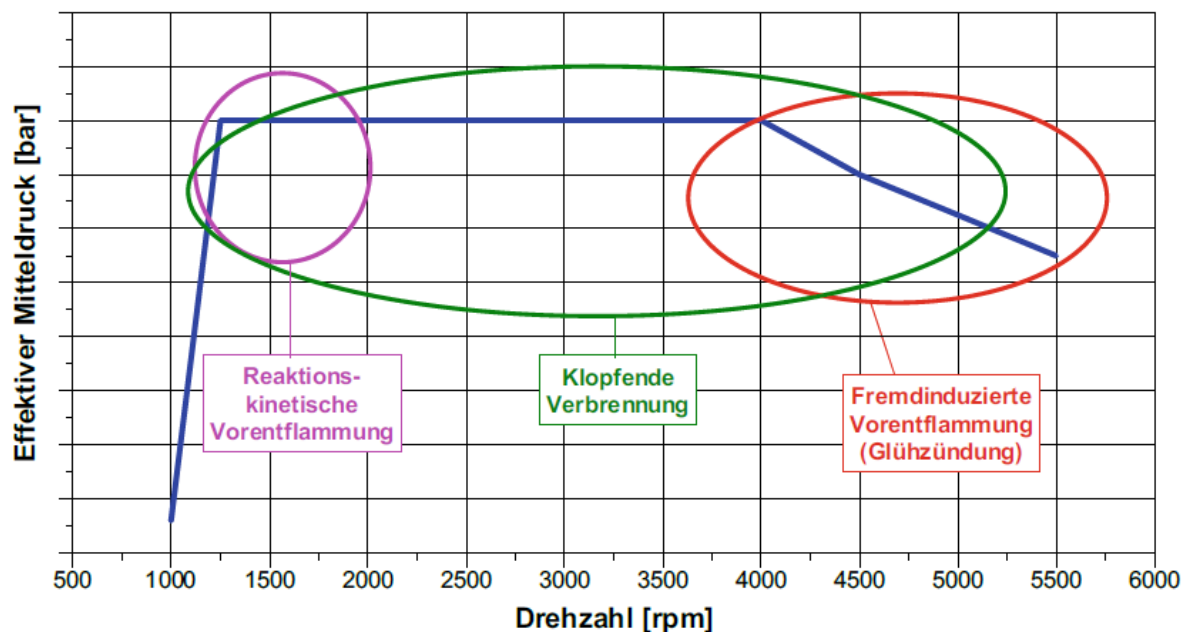


Abbildung 4: Unterteilung irregulärer Verbrennungsvorgänge im Betriebskennfeld, [13]

### 2.3.1 Klopfende Verbrennung

Weicht der Verbrennungsvorgang von der regulären Verbrennung ab, welcher gekennzeichnet durch einen sogenannten weichen Druckverlauf (max. 2 bar/°KW) ist, können dadurch kritische Zustände im Brennraum entstehen. Eine Art der irregulären Verbrennung wird als „Klopfen“ bezeichnet, bei der nach der Entzündung durch die Zündkerze eine spontane Selbstzündung im (noch unverbrannten) Kraftstoff-Luftgemisch stattfindet (siehe Abbildung 5). Dies führt meist zu steilen Druckgradienten aufgrund der sehr raschen (isochoren) Umsetzung des Brennstoffes, hohen Druckbelastungen und starken Druckschwankungen im Brennraum. Diese, dem normalen Druckverlauf überlagerten, hochfrequenten Druckschwingungen werden durch Gasschwingungen im Brennraum ausgelöst und erzeugen dadurch das bekannte Klopfgeräusch. Da es hierbei zu ungewollten und teils unkontrollierbaren Zuständen sowie zu Bauteilschäden am Verbrennungsmotor kommen kann, ist die klopfende Verbrennung stets zu vermeiden. [6]; [7]; [13]; [14]

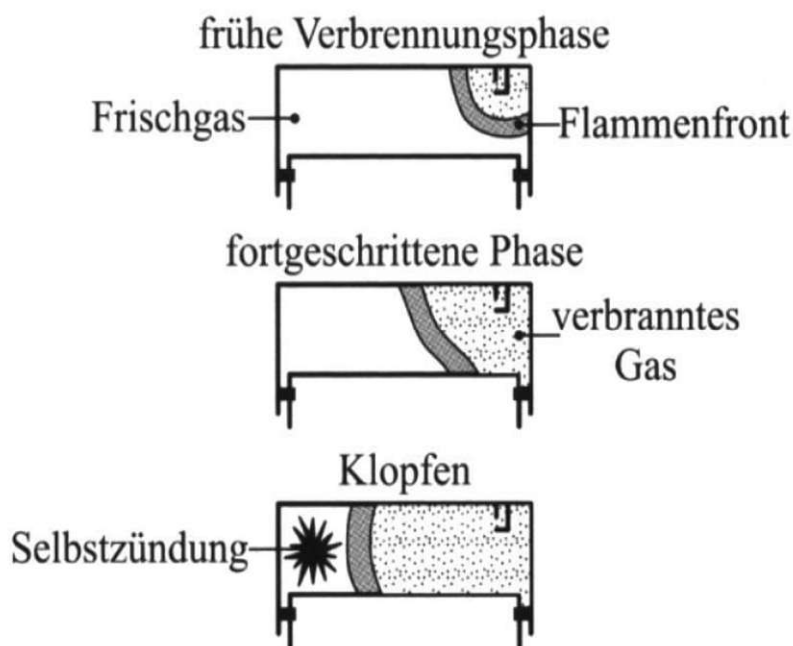


Abbildung 5: Schema einer klopfenden Verbrennung, [7]

Als einfachste Variante um Klopfen vermeiden zu können, gilt die Verschiebung des Zündzeitpunktes in Richtung spät, was wiederum eine Verringerung des thermischen Wirkungsgrades nach sich zieht. Heutige Downsizing-Motoren verfügen über einen Klopfsensor, welcher fortlaufend die Klopfgrenze ermittelt. Das Motorsteuergerät ist dadurch in der Lage anhand der Informationen des Sensors den Zündwinkel einzustellen. Um den Wirkungsgrad bei modernen Motoren weiter erhöhen zu können gilt es bei der Brennraumgestaltung hinsichtlich der Klopfneigung einige Dinge zu beachten, wie beispielsweise kurze Flammenwege, hohe Strömungsgeschwindigkeiten und die



Vermeidung heißer Stellen (Hot Spots) im Brennraum. Weiters bewirken die Betriebsbedingungen und der Kraftstoff einen Einfluss auf die Klopfneigung. Betrachtet man die Betriebsbedingungen, so bewirken hohe Drücke und Temperaturen, ein Betrieb nahe am stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Verhältnis ( $\lambda=1$ ) und ein langsamer Prozessablauf (niedrige Motordrehzahlen) eine erhöhte Klopfneigung. [14]

Eine niedrige Oktanzahl des Kraftstoffes führt ebenfalls zu verminderter Klopfbarkeit. Die Oktanzahl kennzeichnet die Widerstandskraft von Kraftstoffen eine klopfende Verbrennung vermeiden zu können und stellt somit ein Maß für die Klopfbarkeit dar. Als Versuchsträger zur Bestimmung der Oktanzahl dient seit mehreren Dekaden ein normierter Prüfmotor. Eine detaillierte Beschreibung der Oktanzahl sowie deren Bestimmung am CFR-Prüfmotor, folgt in Kapitel 2.4 und 4.1. Abseits dieser genormten Prüfmethodik stellt das Verfahren von Scharlipp et al. [15] eine Ergänzung zur Untersuchung des Klopfverhaltens gasförmiger Kraftstoffe dar. Zu diesem Zweck werden vor allem methanhaltige Kraftstoffe an einem Einzylinderaggregat durch Zündwinkelvariation in Bezug auf deren Klopfneigung charakterisiert und mithilfe der Methanzahl quantifiziert. [14]; [15]

## 2.3.2 Vorentflammung

### Reaktionskinetische Vorentflammung

Zu Beginn werden die reaktionskinetischen Vorentflammungen behandelt. Diese Art der Vorentflammung entsteht durch kritische Zustände in der Gasphase. Die damit verbundenen Untersuchungen haben erst in den letzten Jahren, mit Zunahme von aufgeladenen Downsizing-Motoren, richtig Fahrt aufgenommen. Die Vorentflammung hat bei modernen und effizienten Verbrennungskraftmaschinen einen dominanten Faktor bei der Limitierung des Motorwirkungsgrades eingenommen, da wegen steigendem Ladedruck und höheren Oberflächentemperaturen die Vorentflammungsneigung und die daraus resultierende Gefahr von Bauteilschäden steigt. Analog zur fremdinduzierten Vorentflammung (Glühzündung) findet diese Form der irregulären Verbrennung vor dem gesteuerten Zündimpuls der Zündkerze statt, allerdings tritt diese nur zu stochastisch verteilten Zeitpunkten auf und besitzt niemals selbsterhaltendes oder selbstverstärkendes Verhalten. Die Flammenausbreitung erfolgt schlagartig und die eigentliche Vorentflammung geht meist in starke Druckschwankungen mit hohen Klopfamplituden über. In [Abbildung 6](#) werden die Zylinderdruckverläufe einer Vorentflammung jener der klopfenden und regulären Verbrennung gegenübergestellt. [6]; [7]; [13]; [14]; [16]; [17]

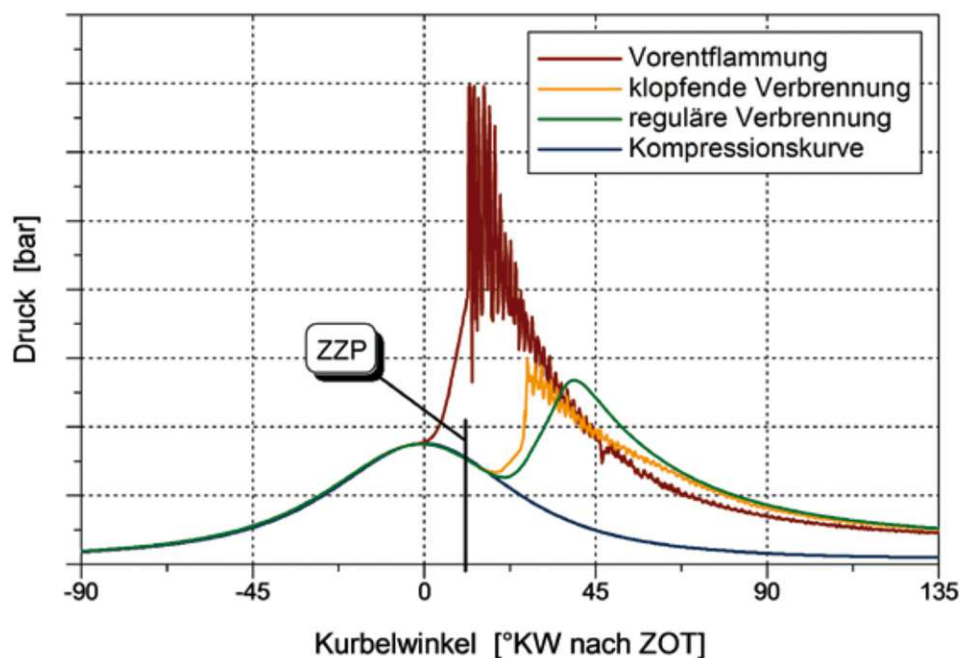


Abbildung 6: Druckverläufe im Zylinder, [16]

Mit der Einführung von direkteinspritzenden Downsizing-Motoren rückten auch die Forschungsaktivitäten rund um Vorentflammungen zunehmend stärker in den Fokus. Hier wurden eine Fülle an möglichen Auslösern erkannt, jedoch ist es bis heute aufgrund des komplexen Entstehungsmechanismus nicht möglich eine klare Aussage über die

Entstehung zu finden. Untersuchungen von Dahnz et al. haben bereits 2010 eine Übersichtstabelle (siehe [Abbildung 7](#)) ergeben. Dadurch können mögliche Ursachen für Vorentflammungen klassifiziert werden. Diese Einteilung kann durch Forschungsergebnisse aus [18]; [19]; [20]; [21]; [22]; [23]; [24] bestätigt werden.

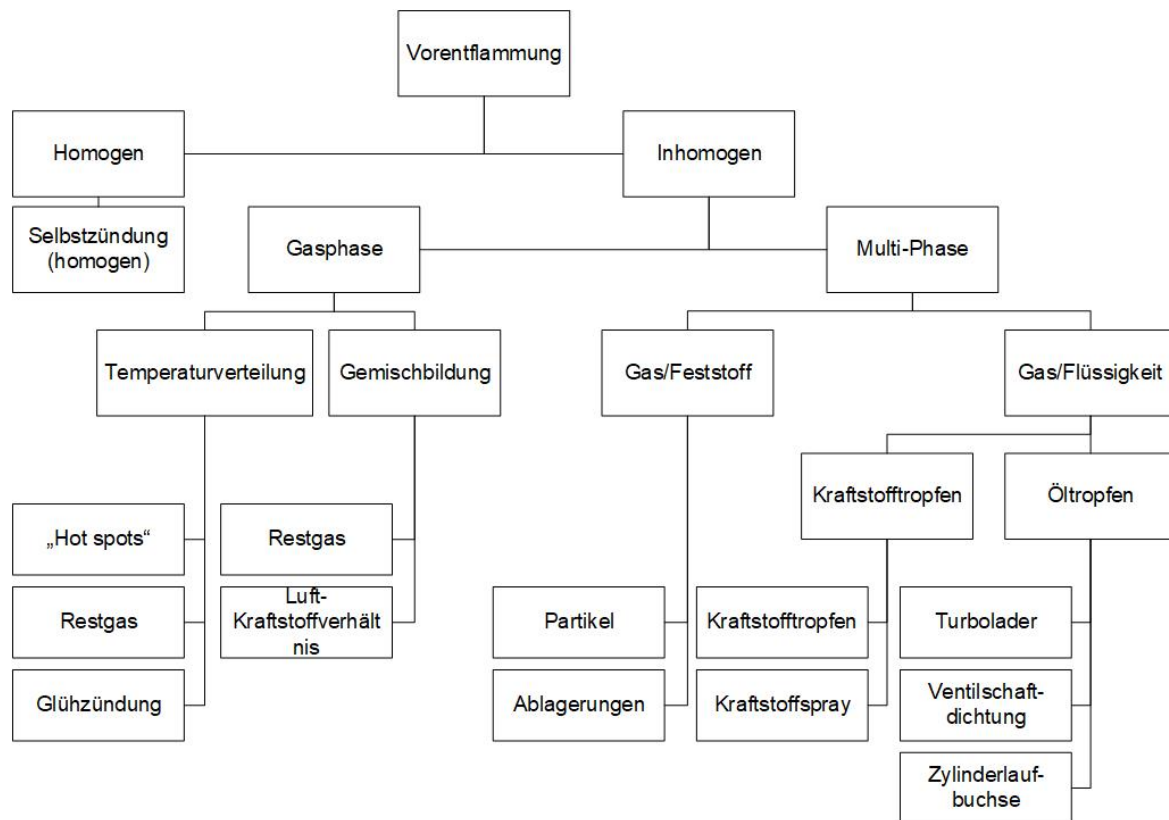


Abbildung 7: Möglichkeiten zur Verursachung einer Vorentflammung, [25]

Eine große Bedeutung spielen vor allem die eingesetzten Betriebsmittel. Warnecke et al. haben bereits vor rund 20 Jahren neue Herausforderungen an Betriebsstoffen durch die Einführung der Direkteinspritzung am Ottomotor erkannt. Öl- oder Kraftstofftropfen, die sich von Stellen im Brennraum ablösen können, tragen demnach maßgeblich zur Bildung von Vorentflammungen bei. In diesem Zusammenhang korrelieren somit Motorparameter wie die Ladungsbewegung und die Spray-Wand-Interaktion mit der Vorentflammungswahrscheinlichkeit. Zudem können sich Partikel im Brennraum selbständig entzünden, welche beispielsweise durch eine Ölverdünnung des Kraftstoffes entstanden sind. Eine höhere Vorspannung des Ölabbstreifringes kann einen Öleintritt in den Brennraum vermindern und ein mögliches Risiko der Ölverdünnung absenken. [25]; [26]; [27]; [28]; [29]; [30]; [31]

Die kraftstoffspezifischen Eigenschaften tragen ebenfalls zu signifikanten Auswirkungen von Vorentflammungen bei. Hinsichtlich dieser Eigenschaften wurden unter anderem folgende relevante Auffälligkeiten in unterschiedlichen Untersuchungen bemerkt: [32]; [33]; [34]; [35]; [36]; [37]; [38]; [39]; [40]; [41]

- kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Oktanzahl und der Vorentflammungshäufigkeit, in manchen Betriebsbereichen des Motors bewirkt jedoch eine hohe Motoroktanzahl nachteilige Effekte
- Vorentflammungsverhalten wird beeinflusst durch die Form der Destillationskurve
- Alkoholkraftstoffe zeigen grundsätzlich eine positive Einflussnahme, verhalten sich im mittleren Temperaturbereich (Intermediärtemperaturbereich) jedoch gegensätzlich zu Kraftstoffen ohne Oxygenate, im Hochtemperaturbereich ist ein identes Verhalten aller Kraftstoffe zu beobachten (ein hoher Gehalt an Paraffinen verstärkt diesen Effekt)
- Ethanol bewirkt durch seine kühlende Wirkung einen positiven Einfluss
- Vorentflammungswahrscheinlichkeit steigt mit höherem Aromatenanteil in gewissen Betriebsbereichen aufgrund der Entstehung von Partikel

Um Vorentflammungen (und eine klopfende Verbrennung) anschaulich darstellen beziehungsweise voneinander abgrenzen zu können, kann man sich der Definition des Zündverzugsanteiles (Ignition Delay Fraction) bedienen. Dieser Kennwert spiegelt die Zündwilligkeit im unverbrannten Gemisch wider. Die Ignition Delay Fraction  $\Gamma$ , lässt sich mit Gleichung 4 beschreiben. [42]

$$\Gamma = \frac{t - t_{ES}}{\tau_{int}} \quad (4)$$

$\Gamma$	Ignition Delay Fraction [-]
$t$	Zeitpunkt t in [s]
$t_{ES}$	Zeitpunkt, Einlass schließt in [s]
$\tau_{int}$	Integrale Zündverzugszeit in [s]

Der daraus resultierende Verlauf gemäß Abbildung 8 beschreibt damit den thermodynamischen Zustand im unverbrannten Kraftstoff-Luft-Gemisch zu einem bestimmten Kurbelwellenwinkel. Übersteigt der Zündverzugsanteil den Wert 1 so findet gemäß Definition Selbstzündung statt. Um eine Einordnung der Verbrennungsanomalien vornehmen zu können sind der Brennbeginn (merkbarer Druckanstieg im Zylinder) und die Flammenankunft (keine Möglichkeit der Selbstzündung im verbleibenden Restgas) von entscheidender Bedeutung. Eine reguläre Verbrennung findet demnach statt, wenn das Streuband die Selbstzündgrenze nach der Flammenankunft erreicht. Ansonsten tritt, je nach Brennbeginn, eine klopfende Verbrennung oder eine Vorentflammung auf. Allgemein gilt es zu beachten, dass die Kurve vielmehr als Streuband

angesehen werden kann, da auch Bereiche mit kürzeren und längeren Zündverzugszeiten in den Arbeitszyklen existieren, sowie alle Größen von Zyklusschwankungen überlagert sind. [42]

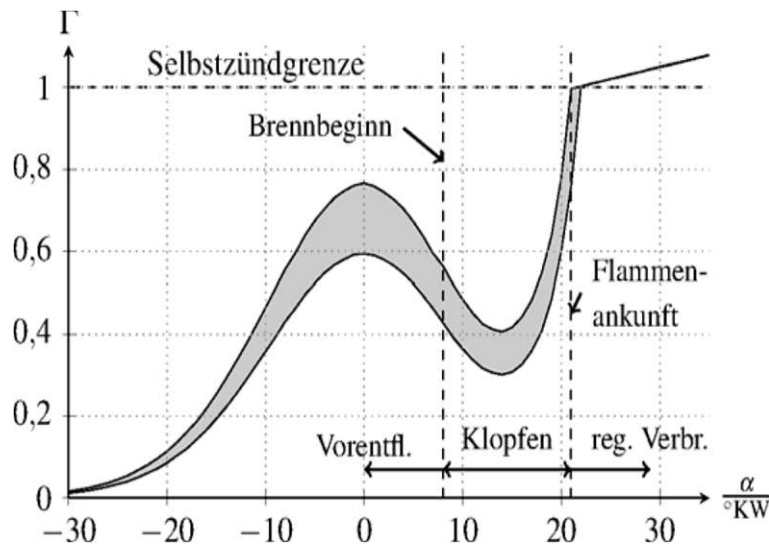


Abbildung 8: Unterscheidung der Verbrennungsanomalien anhand der Zündunwilligkeit, [42]

Ferner gilt es zu beachten, dass die Zündwilligkeit und die Flammenankunft maßgeblich durch den Brennbeginn respektive den Zündzeitpunkt beeinflusst werden. Auch unter Berücksichtigung etwaiger Vorteile muss daher der Zündzeitpunkt mit zunehmender Last und daraus resultierendem höherem Temperaturniveau nach spät verschoben werden, um irreguläre Verbrennungsanomalien zu minimieren. Generell liegt das Streuband jedoch weit entfernt von der Selbstzündgrenze, weshalb davon auszugehen ist, dass Selbstzündungen nur dann möglich werden, wenn (einzelne) starke Inhomogenitäten im Brennraum vorherrschen. Dies kann vorwiegend durch besonders zündwillige Anteile im Motoröl oder empfindliche Komponenten im Kraftstoff hervorgerufen werden. Diese These wird dadurch verstärkt, da auch der Verbrennungsvorgang einer Deflagration (Verpuffung) ähnelt. Grundsätzlich kann eine Vorentzündung für den Verbrennungsmotor als unschädlich angesehen werden, da jedoch in den meisten Fällen anschließend starkes Klopfen auftritt, und dies im Gegensatz zur klopfenden Verbrennung nach der Funkenzündung stattfindet, hat man hier keine Möglichkeit den Mechanismus zu steuern. Deshalb sollte auch das Phänomen der Vorentzündung vermieden werden. In der Untersuchung von [42] wurde ebenso die Erkenntnis darüber gewonnen, dass Vorentzündungen begünstigt bei niedrigen Drehzahlen auftreten. Dieser Tatsache geschuldet werden die reaktionskinetischen Vorentzündungen auch als Low Speed Pre-Ignition (LSPI) bezeichnet. [42]; [43]

Wie bei der klopfenden Verbrennung trägt auch bei der reaktionskinetischen Vorentzündung der eingesetzte Kraftstoff einen erheblichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer Vorentzündung bei. Da die VE-Tendenz eines Kraftstoffes nicht durch die Oktanzahl beschrieben werden kann, liegt das erklärte Ziel der Automobilindustrie

in der Etablierung eines Prüfverfahrens, um das VE-Verhalten eines Ottokraftstoffs zu charakterisieren. Zu diesem Zweck wurden am IFA der TU Wien einerseits eine neu entwickelte Methodik durch Martin et al. [1] an einem modifizierten CFR-Prüfmotor und andererseits eine Testmethodik von Bobicic et al. [44] an einem umgebauten Serien-Dieselmotor erforscht. Die Umbauarbeiten des Dieselmotors umfassten neben dem Austausch der Glühkerze durch eine Zündkerze auch eine Optimierung des Kolbendesigns und der Umrüstung hin zu einer Kanaleinspritzung. Zur Quantifizierung der VE-Stabilität diente in diesem Zusammenhang die neu definierte Vorentflammungszahl (VEZ). Die geringen Abweichungen der Prüfbedingungen zu üblichen Downsizing-Motoren kann bei dieser Methode als positiv erachtet werden. Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt in der Testmethode am CFR-Prüfmotor. Aus diesem Grunde wird diese Methodik in Kapitel 4.1 detailliert beschrieben. [1]; [44]; [45]

### **Fremdinduzierte Vorentflammung (Glühzündung)**

Eine weitere Art der irregulären Verbrennung stellt die Glühzündung an Bauteiloberflächen im Brennraum dar. In diesem Fall erfolgt die Entflammung, des (oberhalb der Selbstentzündungstemperatur liegenden) verwendeten Kraftstoff-Luft-Gemisch abermals unabhängig vom regulären Zündzeitpunkt. Im Gegensatz zur klopfenden Verbrennung kann die entstehende Flammenfront sowie die Flammenausbreitung mit einer regulären Verbrennung verglichen werden, mit dem Unterschied, dass der Zündzeitpunkt stochastisch verteilt ist. Die entstehende Wärmefreisetzung bei dieser Art der Selbstzündung führt im weiteren Verlauf zur kontinuierlichen Temperaturerhöhung im Brennraum und folglich zu einer noch früher und extremer auftretenden Glühzündung mit einer klopfenden Verbrennung als Begleiterscheinung. Somit stellt diese selbsterhaltende beziehungsweise selbstverstärkende Charakteristik durch thermische Überlastung und hohen Druckspitzen eine Gefährdung für sämtliche Brennraumteile (verbrannte Ventile, abgeschmolzene Elektroden an der Zündkerze, zerstörte Kolbenböden, etc.) dar und sollte ebenfalls tunlichst vermieden werden. Eine Unterbrechung der fremdinduzierten Vorentflammung kann nur durch die Abschaltung der Kraftstoffzufuhr erfolgen, andere Methoden sind aufgrund der selbsterhaltenden Charakteristik wirkungslos. [43]; [46]

Eine hohe thermische Belastung und dementsprechend hohe Oberflächentemperaturen im Brennraum sowie unzureichende Wärmeabfuhr sind Voraussetzung für Selbstentzündungen an Bauteiloberflächen im Brennraum. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Glühzündung ist abhängig von der Position der heißen Bauteiloberfläche und wie stark diese in den Brennraum ragt. Deshalb sind üblicherweise Bauteile wie Zündkerze, Ventile oder Quetschkanten von der Thematik betroffen. Als Einflussgrößen gelten zudem die Kraftstoffart und -qualität, das Luft-Kraftstoff-Verhältnis und Ablagerungen im Brennraum. Erwähnenswert hierbei ist, dass bei einer geringen

Beimischung unterschiedlicher regenerativer Kraftstoffkomponenten (Oxygenate) die Glühzündungsresistenz im Vergleich zu einem herkömmlichen Ottokraftstoff (ROZ 95) zunimmt, diese sich jedoch bei hohen Beimischraten (E85 und höher) verschlechtert. Dies kann durch die niedrigere Zündenergie von Alkoholkomponenten erklärt werden. [31]; [34]; [35]; [46]; [47]

Die Gefahr durch die selbsterhaltende Charakteristik der Glühzündungen haben Günther et al. [46] durch deren Versuche eindeutig dargelegt. Für die Untersuchungen wurde der Einzylinder-Forschungsmotor mit einem steuerbaren Glühstift ausgestattet. Ausgehend von einer bereits erhöhten Brennraumtemperatur durch die späte Umschwerpunkt-lage ( $45^\circ\text{KW}$  nach OT) wird die Temperatur am Glühstift kontinuierlich erhöht. Bei Erreichen eines definierten Druckschwellenwerts wird die Zündung abgeschaltet und die Verbrennungszyklen aufgezeichnet. Anhand Abbildung 9 ist klar ersichtlich, dass weitere Glühzündungsereignisse auch nach dem Abschaltzyklus am Motor auftreten können.

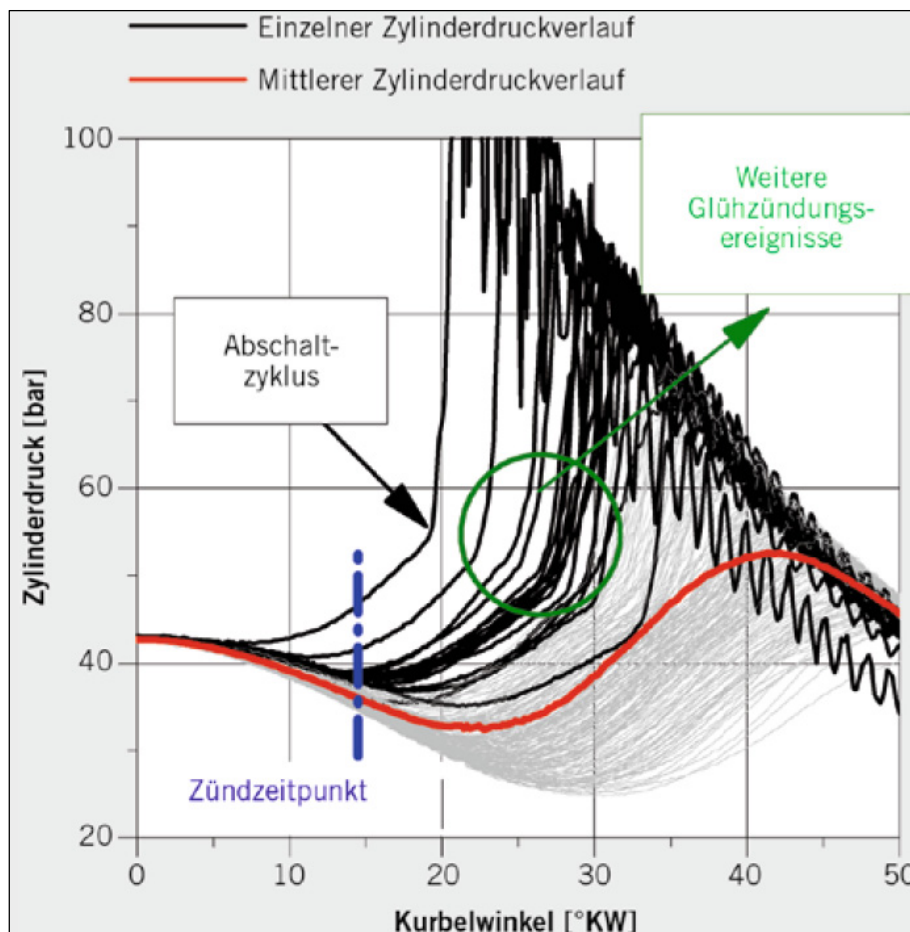


Abbildung 9: selbsterhaltende Charakteristik von Glühzündungen, [46]

## 2.4 Kraftstoffe

### 2.4.1 Bestandteile und Anforderungen herkömmlicher Kraftstoffe

Ottomotorische Kraftstoffe zählen zu den leichtsiedenden Bestandteilen des Erdöls und werden durch Aufbereitung von Erdöl seit über 100 Jahren insbesondere im Individualverkehr erfolgreich eingesetzt. Auch wenn die Eigenschaften von Ottokraftstoffen zur Weiterentwicklung des Ottomotors ständig angepasst werden müssen und die Anforderungen entsprechend dem Umweltschutz stetig steigen sind sie aufgrund zahlreicher Aspekte nach wie vor besonders geeignet. Erdöl besteht aus Verbindungen von Kohlenwasserstoffen sowie Sauerstoff-, Schwefel und Stickstoffverbindungen. Der molekulare Aufbau beziehungsweise die unterschiedliche Aneinanderreihung der (Kohlenwasserstoff-)Atome bestimmen die physikalischen und chemischen Eigenschaften (Siedetemperatur, Dichte, etc.) des Kraftstoffes. [14]

Der fertig raffinierte Ottokraftstoff besteht aus rund 200 Kohlenwasserstoffverbindungen, wobei die Mischung je nach Verfügbarkeit und Preis regional schwanken kann, die Mindestanforderungen nach der europäischen Kraftstoffnorm DIN EN 228 aber jedenfalls erreicht werden müssen. Das Gemisch enthält neben den Kohlenwasserstoffverbindungen mittlerweile auch Sauerstoffverbindungen wie beispielsweise Alkohole und Ether. Die sauerstoffhaltigen Verbindungen haben, die früher wichtigen jedoch heute verbotenen Bleiverbindungen ersetzt, um dem Oktanzahlverlust entgegenzuwirken. Bevor der Kraftstoff an der Zapfsäule dem Endkunden zur Verfügung steht, werden den Kraftstoffen noch zusätzliche chemische Wirkstoffe – auch bekannt als Additive – hinzugefügt. [4]; [6]; [14]

Das Herzstück von organischen Kohlenwasserstoffverbindungen ( $C_xH_y$ ) bildet immer das vierwertige Kohlenstoffatom ab. Die stöchiometrische Wertigkeit (Kohlenstoff ist immer vierwertig) oder auch Valenz eines Atoms ist jene Zahl die das Maximum an einwertigen Atomen (beispielsweise Wasserstoff) angibt, welche mit einem Atom eines Elements gebunden oder ersetzt werden können. Dadurch ist es, insbesondere dem Kohlenstoffatom, möglich die unterschiedlichsten Verbindungen (geradlinig, verzweigt, ringförmig) mit dem Wasserstoffatom einzugehen. Ferner hat die Vielzahl an unterschiedlichen Konstellationen der Atome beziehungsweise die Molekülstruktur einen Einfluss auf die Reaktivität des chemischen Elementes und somit auch auf die Verbrennung im Ottomotor. Eine Einteilung von einfachen Kohlenwasserstoffverbindungen inklusive der sauerstoffhaltigen Verbindungen, sogenannte  $C_xH_yO_z$ -Verbindungen, kann gemäß der Anordnung und Art der Atombindungen erfolgen, welche nachfolgend detailliert beschrieben ist. [6]; [48], [49]



## Aliphatische Kohlenwasserstoffverbindungen

Die erste und ebenso größte Gruppe innerhalb der aliphatischen Kohlenwasserstoffverbindungen bilden die Alkane (früher Paraffine) mit der allgemeinen Summenformel  $C_nH_{2n+2}$ . Diese zur Stoffgruppe der gesättigten, azyklischen Kohlenwasserstoffe zugehörigen Verbindungen werden wiederum unterteilt in Normal-Alkane mit gerader Struktur und Iso-Alkane mit verzweigter Struktur, beide sind jedoch ausschließlich kettenförmig aufgebaut und besitzen immer Einfach-Bindungen. Relevante Vertreter dieser Gruppe sind das Isooktan ( $C_8H_{18}$ ) und das n-Heptan ( $C_7H_{16}$ ). Diese Zweikomponenten-Ersatzbrennstoffe werden zur Klopffestigkeitsbestimmung am CFR-Prüfmotor verwendet. Die Reaktivität erhöht sich mit steigender Kettenlänge, sinkt jedoch mit zunehmender Verzweigung beziehungsweise Kompaktheit der Alkanmoleküle. Ferner weisen Kohlenstoffverbindungen mit hohem Paraffingehalt eine stark ausgeprägte NTK-Charakteristik auf. [6]; [48]; [49]; [50]

Aliphatische CH-Verbindungen mit einer oder zwei Doppelbindungen werden als Alkene (früher Olefine) bezeichnet. Ferner unterscheidet man bei den ebenfalls kettenförmig aufgebauten Alkenen zwischen den Alkenen mit einer Doppelbindung und Alkadienen mit zwei Doppelbindungen. Die Summenformel der Alkene ergibt sich zu  $C_nH_{2n}$ . Ferner seien noch die sogenannten Alkine (früher Acetylene) mit der Summenformel  $C_nH_{2n-2}$  genannt. Diese unterscheiden sich zu den beiden vorher genannten durch eine Dreifachbindung der Kohlenstoffatome. Eine Doppel- oder Dreifachbindung führt zu einer niedrigeren Reaktivität sowie zu einer begrenzten Langzeitstabilität im Vergleich zu den Alkanen mit Einfach-Bindungen. [6]; [48]; [49]

Neben den azyklischen Alkanen seien noch die zyklischen Alkane (früher Naphtene) genannt. Diese besitzen im Vergleich zu den vorher genannten einen ringförmigen Aufbau mit Einfach-Bindungen. Die Summenformel lautet ident zu den azyklischen Alkenen  $C_nH_{2n}$ . Analog zu den Alkanen führt bei den Zyko-Alkanen eine erhöhte Länge der Seitenkette zu einer erhöhten Reaktivität, eine Verzweigung innerhalb der Seitenketten führt wiederum zu einer reduzierten Reaktivität. Die Strukturformeln der aliphatischen Kohlenwasserstoffverbindungen sind anhand von Beispielbindungen in Abbildung 10 gegeben. [48]; [49]

Alkane $C_nH_{2n+2}$	
<u>Normal-Paraffine</u> gerad-kettenförmig $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ Ethan	<u>Iso-Paraffine</u> verzweigt-kettenförmig $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \quad \text{H} \\   \quad   \quad   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \quad   \quad   \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \quad \text{H} \end{array}$ 2,2 Dimethylpropan
Alkene $C_nH_{2n}$	
<u>Alkene (Monoolefine)</u> kettenförmig, <u>eine</u> DB $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C}=\text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ Ethen	<u>Alkadiene (Diolefine)</u> kettenförmig, <u>zwei</u> DB $\begin{array}{c} C_nH_{2n-2} \quad \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \quad   \\ \text{C}=\text{C}=\text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ Propadien (Allen)
Alkine $C_nH_{2n-2}$	
$\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$	Ethin
Zyklo-Alkene $C_nH_{2n}$	
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} \\ / \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ Zyklopropan	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} \\ / \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{C} \quad \text{C} \quad \text{H} \\   \quad   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C} - \text{C} - \text{H} \\ / \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ Zyklohexan

Abbildung 10: Strukturformeln der aliphatischen Kohlenwasserstoffverbindungen, [6]

## Aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen

Aromaten stellen neben den Alkanen den größten Anteil von üblichen Ottokraftstoffen dar. Die ringförmig aufgebauten Kohlenwasserstoffe mit konjugierten Doppel-Bindungen sind zyklische Moleküle, da der Grundstock immer durch den Benzolring gebildet wird. Die Aromaten zeichnen sich – bewirkt durch die Doppelbindung – durch eine hohe Klopffestigkeit, eine hohe Zündtemperatur und durch eine gute thermische Stabilität aus. Letzteres kann jedoch bei zu hohen Anteilen im Kraftstoff zu erhöhter Partikelkonzentration beziehungsweise unverbrannten Kohlenwasserstoffemissionen führen. Die Strukturformel von Benzol und Dymethylbenzol, welche der Klasse der aromatischen Kohlenwasserstoffe angehören, sind in [Abbildung 11](#) ersichtlich. [48], [49]

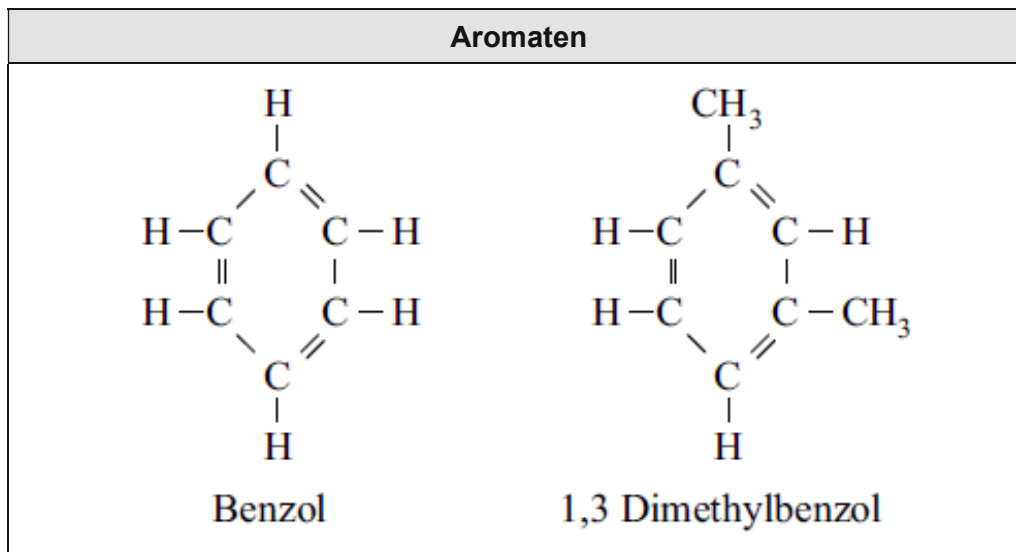


Abbildung 11: Strukturformeln der Aromatenverbindungen, [6]

## Sauerstoffhaltige Verbindungen

Organische Verbindungen enthalten neben den Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen auch noch mindestens ein kovalent gebundenes Sauerstoffatom. Eine Einteilung der kettenförmig aufgebauten Moleküle kann vorgenommen werden in die Alkohole (Alkane), die Ether und die Phenole. Relevante Bestandteile für moderne Ottokraftstoffe sind der Methylalkohol (Methanol), der Ethylalkohol (Ethanol) und die zur Gruppe der Ether gehörenden Ethyltertiärbutylether (ETBE) sowie Methyltertiärbutylether (MTBE). Die Strukturformeln jener relevanten Kraftstoffbestandteile sind in [Abbildung 12](#) dargestellt. [6]

Durch die Zugabe von Alkoholen und Ether ergeben sich einerseits Vorteile wie erhöhte Klopffestigkeit, hohe Brenngeschwindigkeit und eine hohe Verdampfungsenthalpie. Letzteres entzieht bei direkteinspritzenden Ottomotoren dem Brennraum Wärme und besitzt damit eine kühlende Wirkung. Andererseits bringt eine Beimischung mit Alkoholen auch Nachteile mit sich. Hier sei vor allem der niedrige volumetrische Heizwert erwähnt, welcher zu Mehrverbrauch im Betrieb führt. Ether kommen

ebenso zum Einsatz, um die Klopfestigkeit zu erhöhen, besitzen allerdings – analog zu den Alkoholen – laut der Kraftstoffnorm DIN EN 228 eine Gehaltsobergrenze entsprechend der Kraftstoffsorte. [35]; [36]; [51]; [52]

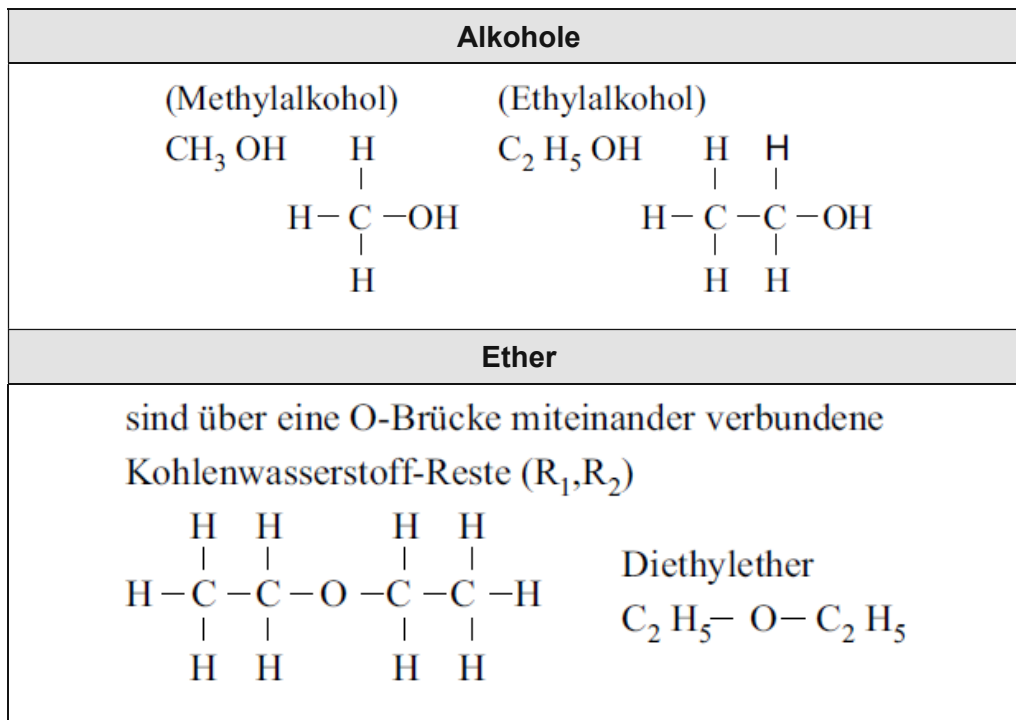


Abbildung 12: Strukturformeln der sauerstoffhaltigen Verbindungen, [6]

Die Kennwerte und die Mindestanforderungen an bleifreien Ottokraftstoff Super beziehungsweise Super Plus laut DIN EN 228 sind in Tabelle 1 ersichtlich. Um die Klopfestigkeit näher zu definieren, wurde die Oktanzahl eingeführt. Hierbei unterscheidet man zwischen der Research-Oktanzahl (ROZ) und der Motor-Oktanzahl (MOZ). Die errechnete Differenz der beiden zuvor genannten Oktanzahlen wird als Sensitivität S bezeichnet. Die Kennziffern dieser beiden reichen jeweils von 0 bis 100, wobei 0 besonders klopfreudig und 100 besonders klopfest bedeutet. Wie diese Zahlen bestimmt werden, wird in Kapitel 4.1 beschrieben. Während in Europa die ROZ an den Zapfsäulen der Tankstelle angegeben ist, wird in Nordamerika meist die Average Octane Number (AON) verwendet. Diese berechnet sich aus der Summe aus ROZ und MOZ geteilt durch 2. Weitere Definitionen der Oktanzahl, wie beispielsweise die Straßenoktanzahl (SOZ) oder die Front-Oktanzahl (FOZ) werden in dieser Diplomarbeit nicht näher erläutert. [5]; [6]; [14]

Tabelle 1: Teilauszug aus der Kraftstoffnorm DIN EN 228 zur Definition der Anforderungen für unverbleiten Ottokraftstoff Super/Super Plus (E5), [5]

Eigenschaft	Einheit	Grenzwerte	
		Super	Super Plus
Research-Oktananzahl, ROZ	-	95.0 (min.)	98.0 (min.)
Motor-Oktananzahl, MOZ	-	85.0 (min.)	88.0 (min.)
Bleigehalt	mg/l	5.0 (max.)	
Dichte (bei 15°C)	kg/m <sup>3</sup>	720.0 – 775.0	
Siedeverlauf Klasse A (Sommer)	% (V/V)		
% verdampft bei 70°C		20.0 – 48.0	
% verdampft bei 100°C		46.0 – 71.0	
% verdampft bei 150°C		75.0 (min.)	
Siedeverlauf Klasse D/D1 (Winter/Übergangszeit)	% (V/V)		
% verdampft bei 70°C		22.0 – 50.0	
% verdampft bei 100°C		46.0 – 71.0	
% verdampft bei 150°C		75.0 (min.)	
Siedeendpunkt (FBP)	°C	210 (max.)	
Schwefelgehalt	mg/kg	10.0 (max.)	
Mangangehalt	mg/l	2.0 (max.)	
Oxidationsstabilität	min	360 (min.)	
Abdampfrückstand (gewaschen)	mg/100 ml	5 (max.)	
Korrosionswirkung auf Kupfer (3h bei 50°C)	Korrosionsgrad	Klasse 1	
Aussehen	-	klar und trübungsfrei	
Olefinegehalt	% (V/V)	18.0 (max.)	
Aromatengehalt	% (V/V)	35.0 (max.)	
Benzolgehalt	% (V/V)	1.0 (max.)	
Methanolgehalt	% (V/V)	3.0 (max.)	
Ethanolgehalt	% (V/V)	10.0 (max.)	
Ether (5 oder mehr C-Atome)	% (V/V)	22.0 (max.)	
andere sauerstoffhaltige Verbindungen	% (V/V)	2.7 (max.)	
Sauerstoffgehalt	% (m/m)	2.7 (max.)	

### 2.4.2 Zukünftige Kraftstoffe

Neben den Veränderungen am Verbrennungsmotor in Form der beschriebenen Downsizing-Maßnahmen steht auch der Energieträger selbst im Fokus der Entwicklungen. Neben den bekannten Vertretern von alternativen Ottokraftstoffen wie beispielsweise alkoholhaltigen Kraftstoffen, Erd- und Flüssiggas usw. fällt in diesem Zusammenhang auch immer wieder der Begriff des e-Fuels. Unter den Terminus e-Fuel (Elektrokraftstoff) fallen synthetische Kraftstoffe, deren chemischer Energieinhalt aus elektrischer Energie stammt, weshalb hier oftmals auch von einer indirekten Elektrifizierung gesprochen wird. Die Art der Herstellung synthetischer Kraftstoffe weicht grundlegend von der Produktion herkömmlicher Kraftstoffsorten ab. Das Endprodukt und deren Verbrennung unterscheidet sich hingegen kaum. Sie bestehen ebenso aus Kohlenwasserstoffmolekülen und haben dadurch Vorteile in den chemischen und physikalischen Eigenschaften (Energiedichte, Siedeendpunkt, etc.) gegenüber den genannten alternativen und herkömmlichen Ottokraftstoffen. Zur Herstellung von e-Fuels sind im Gegenzug zu konventionellen Kraftstoffen keine fossilen Rohstoffquellen mehr notwendig, vielmehr kann, wie in Abbildung 13 schematisch dargestellt, der erforderliche Kohlenstoff aus Kohlenstoffdioxid zurückgewonnen werden und Wasserstoff mittels Elektrolyse erzeugt werden. [3]; [53]

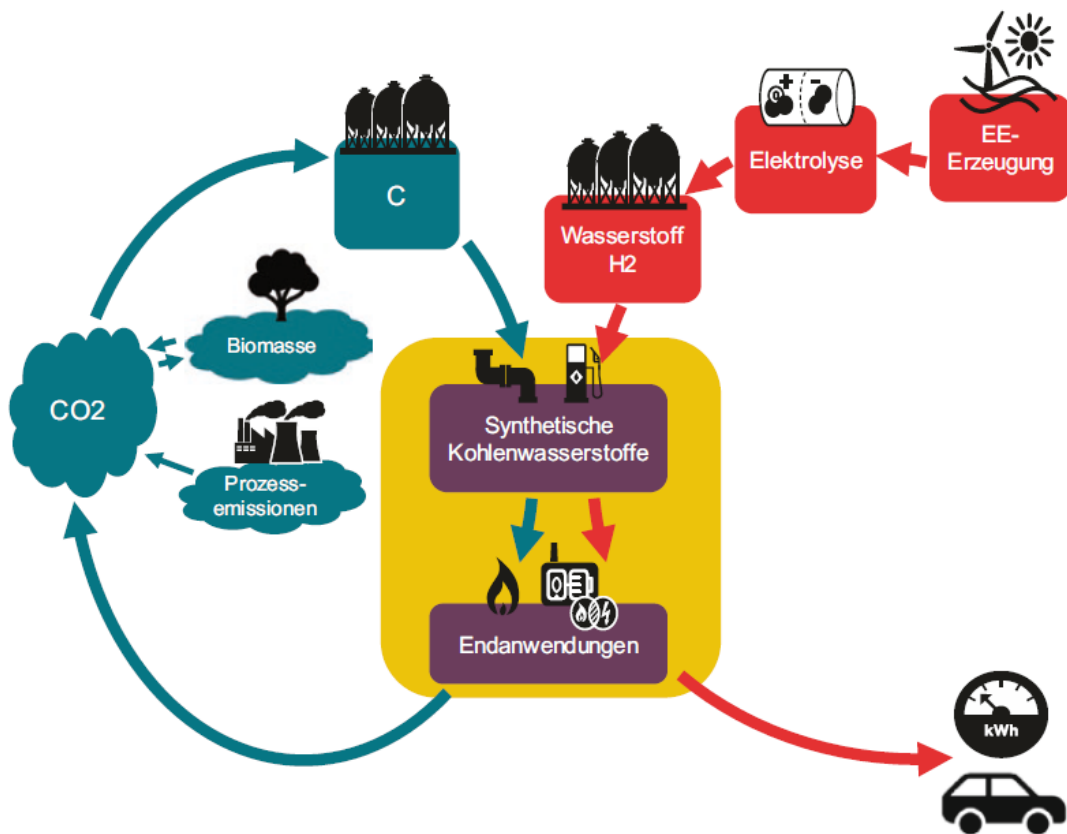


Abbildung 13: schematische Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs und Gewinnung von Wasserstoff zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, [3]

Die H<sub>2</sub>-Erzeugung geschieht im Optimalfall durch Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien (Power-to-Gas, PtG). Um „grünen“ Kohlenstoff zu gewinnen, gibt es mehrere Optionen mit entsprechenden Vor- und Nachteilen. Neben der CO<sub>2</sub>-Gewinnung aus Biomasse oder Prozessemissionen, wie in Abbildung 13 dargestellt, besteht außerdem die Möglichkeit CO<sub>2</sub> direkt aus der Luft zu gewinnen. Damit die Herstellung und Verwendung von synthetischen Kohlenwasserstoffen langfristig rentabel werden, sollten auch Synergieeffekte innerhalb der verschiedenen Sektoren der Energiewirtschaft beachtet und in eine wirtschaftliche Gesamtbetrachtung miteinbezogen werden. Nach derzeitigem Stand gibt es weltweit zwar bereits Forschungs- und Pilotanlagen zur erfolgreichen Herstellung von e-Fuels in begrenzter Menge, eine größere Nachfrage kann derzeit noch nicht abgedeckt werden. Jedoch sind Anlagen mit größerer Kapazität bereits geplant beziehungsweise stehen vor deren Fertigstellung, wenn auch die Hochlaufzeit entsprechender Anlagen bis zu 10 Jahre andauern kann. Dementsprechend kann, auch in Anbetracht steuerlicher Veränderungen, noch keine fundierte Aussage über Kraftstoffpreise getroffen werden. [3]; [53]; [54]

Dass synthetisch hergestellte Kraftstoffsorten gegenüber konventionellen Kraftstoffen beim Einsatz in Ottomotoren jedenfalls keine Nachteile aufweisen, kann von einigen Publikationen bestätigt werden. Hier wird unter anderem von geringerem Kraftstoffverbrauch, einer Minderung des Partikelaustrisses und höheren Oktanzahlen berichtet. Zudem weisen Kraftstoffe mit hohem Gehalt an sauerstoffhaltigen Verbindungen aus synthetischer Herstellung die gleichen Kennwerte, wie beispielsweise eine hohe Verdampfungsenthalpie, wie deren Pendant aus konventioneller Herstellung auf. Anhand dieser Tatsachen werden Prüfverfahren zur Kraftstoffcharakterisierung auch bei zukünftigen Kraftstoffen nicht an Relevanz verlieren. [55]; [56]; [57]

### 3 Auswahl der Kraftstoffe

Zur Durchführung des Messprogrammes werden fünf Kraftstoffproben vom Mineralölunternehmen Shell zur Verfügung gestellt. Diese fünf Basiskraftstoffe entstammen dem europäischen Markt und entsprechen somit der Kraftstoffnorm DIN EN 228. Anhand von Bildaufnahmen konnten vorab bereits visuelle Unterschiede zwischen den fünf marktkonformen Benzinproben festgestellt werden, welche in Abbildung 14 zu sehen sind. Die Bezeichnung der Proben, mit derer diese in den folgenden Kapiteln bezeichnet werden, ist ebenfalls in Abbildung 14 vermerkt. [5]

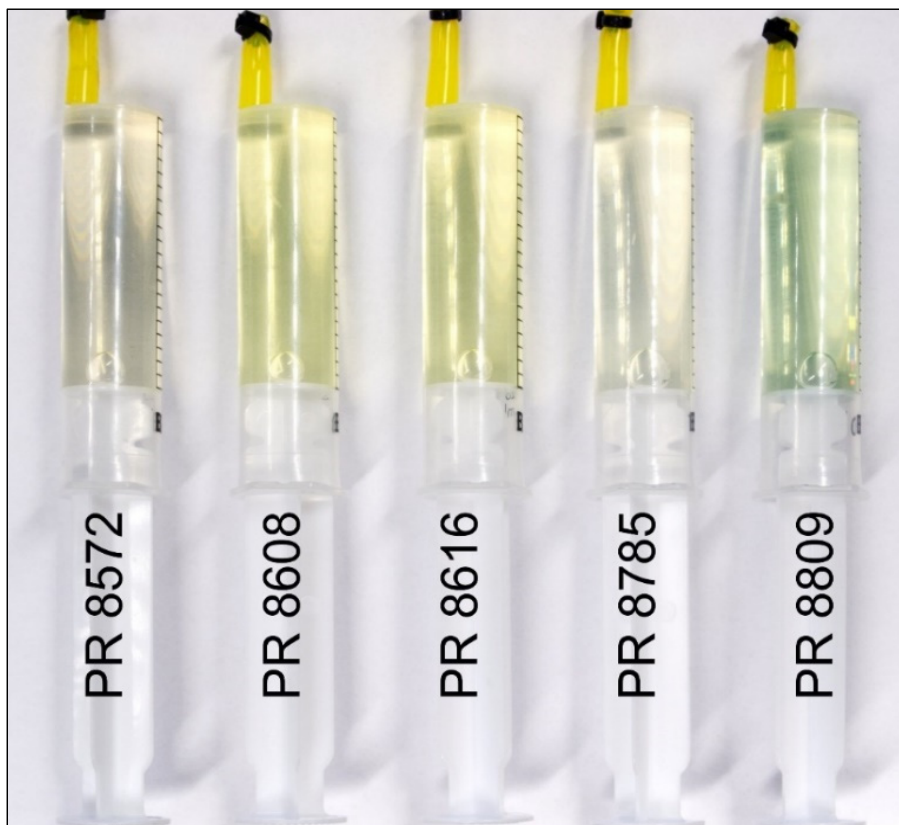


Abbildung 14: Visualisierung der Kraftstoffproben



Die chemische Zusammensetzung der überlieferten Proben ist in Tabelle 2 ersichtlich.

Tabelle 2: Auszug aus dem Testreport der Kraftstoffanalyse (chemische Bestandteile der Kraftstoffproben)

<b>Eigenschaft</b>	<b>Einheit</b>	<b>PR 8572</b>	<b>PR 8608</b>	<b>PR 8616</b>	<b>PR 8785</b>	<b>PR 8809</b>
Paraffine	% (V/V)	48.1	55.9	39.7	48.7	60.0
Olefine	% (V/V)	7.7	7.5	9.3	5.8	6.9
Naphthene	% (V/V)	4.8	4.7	11.9	3.2	7.1
Aromaten	% (V/V)	30.2	30.8	34.2	30.4	17.4
Methanol	% (V/V)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ethanol	% (V/V)	9.1	0.0	4.9	0.0	0.0
MTBE	% (V/V)	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6
ETBE	% (V/V)	0.0	0.0	0.0	13.4	0.0

Die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung zeigt auf, dass die Mindestanforderungen für Ottokraftstoff laut Tabelle 1 von allen verwendeten Proben eingehalten werden. Der Probenkraftstoff PR8608 weist im Vergleich zu den restlichen vier Proben keinerlei Inhalte an sauerstoffhaltigen Verbindungen zur Erhöhung der Oktanzahl auf. Die erforderliche Oktanzahl wird in diesem Fall durch den hohen Gehalt an Paraffinen und Aromaten sichergestellt. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal besitzt die Probe PR8809 durch den, im Vergleich zu den restlichen Proben, niedrigen Aromatengehalt. Der Gehalt an Aromatenverbindungen befindet sich bei den vier verbleibenden Proben an der Obergrenze (35%vol).

Neben den chemischen Komponentenanteilen werden auch bezüglich der physikalischen Eigenschaften von der Kraftstoffnorm DIN EN 228 Mindestanforderungen gefordert. Insbesondere die Flüchtigkeit ist hier ein entscheidendes Kriterium. Diese kann anhand des Siedeverhalten des Kraftstoffes beschrieben werden. Zu diesem Zweck ist in Abbildung 15 der Siedeverlauf der verwendeten Kraftstoffproben abgebildet.

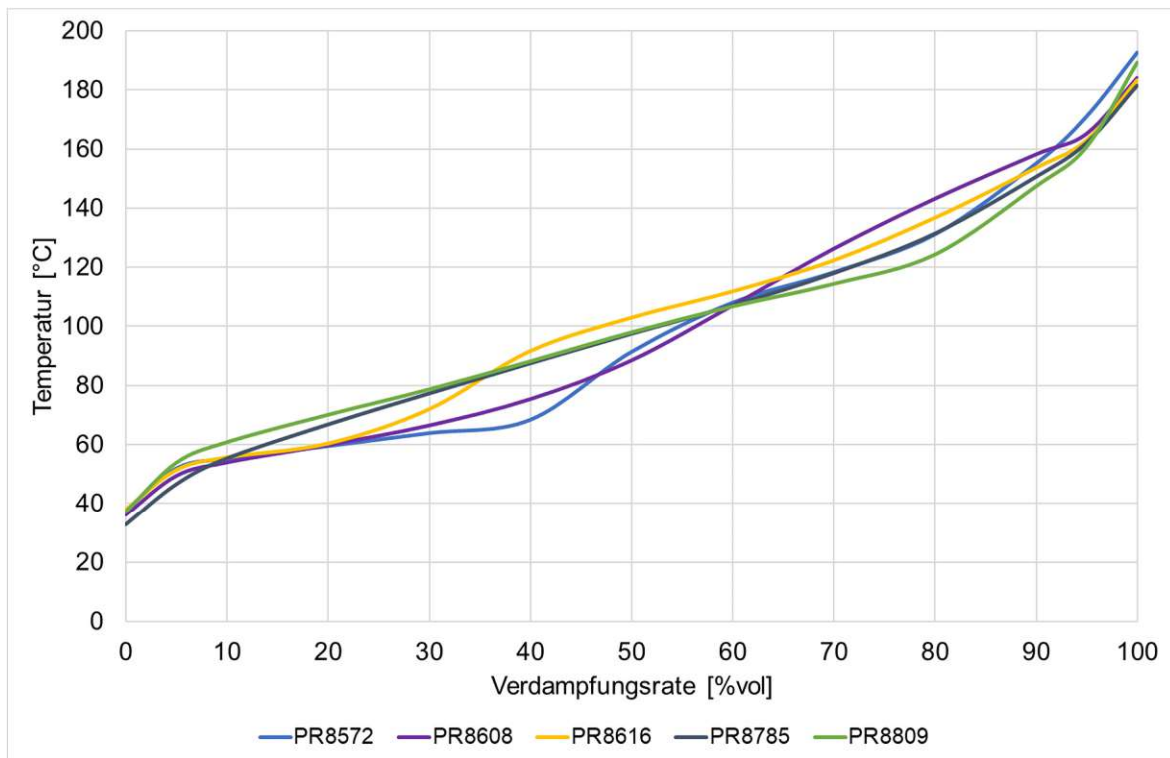


Abbildung 15: Siedeverlauf der verwendeten marktkonformen Kraftstoffproben

Die Siedecharakteristik der untersuchten Proben ist weitläufig ähnlich, wenn auch in Teilbereichen geringfügige Unterschiede in den Siedekurven ersichtlich sind. So verdampft beim Probenkraftstoff PR8572 bereits rund 40%vol bei knapp 70°C, während die restlichen Proben teils deutlich darüber liegen. Der gemessene Siedeendpunkt (Final Boiling Point, FBP) weicht um höchstens 10°C ab, entspricht aber allenfalls den Anforderungen. Jedenfalls werden sämtliche Flüchtigkeitsanforderungen laut der Kraftstoffnorm DIN EN 228 von allen fünf untersuchten Kraftstoffen erfüllt.

## 4 Methodik

### 4.1 CFR-Prüfmotor

#### Research- und Motoroktanzahl (ROZ/MOZ)

Um die zuvor genannte Oktanzahl zu bestimmen wird ein sogenannter CFR-Motor (Cooperative Fuel Research) zu experimentellen Versuchen verwendet. Dieser Motor wurde in den 1930er Jahren entwickelt und verfügt über eine stufenlos verstellbare Verdichtung sowie äußerer Gemischbildung durch einen Vergaser. Der Prüfmotor wird hierfür mit zwei Referenzkraftstoffen (n-Heptan und Isooktan) und der zu prüfenden Kraftstoffprobe bei bestimmten Betriebsbedingungen (siehe [Tabelle 3](#)) betrieben, um anschließend daraus die Klopfstärke des Prüfmotors berechnen zu können. Abgeleitet aus der Klopfstärke lässt sich die Oktanzahl als dimensionslose Größe bestimmen. Im Anschluss daran wird diese zur Bewertung der motorischen Klopfestigkeit eines Kraftstoffes herangezogen. In der Messmethodik unterschieden wird hierbei noch zwischen der ROZ- und der MOZ-Methodik. Den exakten Ablauf der Prüfungen kann den Normen DIN EN-ISO 5163 für die MOZ, sowie DIN EN-ISO 5164 für die ROZ entnommen werden. Ferner sind bei der Prüfung von Alkoholen und Alkoholmischkraftstoffen zusätzliche Abweichungen in der Messmethodik zu beachten. Angaben zu jenen Abweichungen sind in der DIN 51756-7 zu finden. [58]; [59]; [60]

Tabelle 3: Betriebsbedingungen der ROZ/MOZ-Kraftstoffprüfung abgeleitet aus der Prüfanweisung DIN EN-ISO 5163 (5164), [58]; [59]

Motorbetriebsbedingung		ROZ	MOZ
Gemischbildung	[-]	Vergaser	Vergaser
Drehzahl	[min <sup>-1</sup> ]	600	900
Zündzeitpunkt	[°KW vor ZOT]	konstant	f(ε)
MFB50%	[°KW nach ZOT]	f(ZZP)	f(ZZP)
Ansauglufttemperatur	[°C]	52	38
Gemischtemperatur	[°C]	-	149
Ladedruck	[mbar absolut]	-	-
Luft-Kraftstoff-Verhältnis	[-]	variabel	variabel
Einspritzende	[°KW vor ZOT]	-	-
Kraftstoffraildruck	[bar]	-	-
Verdichtungsverhältnis	[-]	variabel	variabel

## Compression Pre-Ignition Kennzahl (CPI)

Untersuchungen am IFA der TU Wien haben gezeigt, dass aufgrund der äußeren Gemischbildung bei größer werdendem Alkoholanteil im Kraftstoff es zu einer erheblichen Wandfilmbildung am Saugrohr kommt und dadurch die Gemischaufbereitung negativ beeinflusst wird. Die theoretisch vorhandene hohe Klopfestigkeit von Alkoholkraftstoffen, durch eine hohe Verdampfungsenthalpie und der vorherrschenden chemischen Struktur, kann somit mittels der ROZ/MOZ-Messung am CFR-Motor nicht nachgewiesen werden. Grund dafür ist der hohe Wandwärmeverlust des Saugrohres durch ein zu frühes Verdampfen des (Alkohol-)Kraftstoffes.

Zudem wird, insbesondere beim MOZ-Verfahren, der Kühleffekt von Alkoholbestandteilen durch die Verdampfungsenthalpie, im Brennraum, ausgelöst durch die hohe Vorheiztemperatur des Gemisches, eliminiert. Das tatsächliche Klopfverhalten von Kraftstoffen mit erhöhtem Alkoholanteil in modernen Serienmotoren wird durch oben genannte Mängel in der Gemischaufbereitung beziehungsweise durch die Betriebsbedingungen des Prüfverfahrens am CFR-Motor nicht richtig wiedergegeben. Flüssige Anteile können ebenso über das Saugrohr in den Brennraum gelangen und in weiterer Folge Verbrennungsanomalien auslösen. Ferner ist die eingesetzte Klopfdetektion aus mehreren Gründen nicht weiter zeitgemäß und kann deshalb auch zu fehlerhaften Signalen führen. [1]; [61]; [62]

Durch die Notwendigkeit einer Neuentwicklung der derzeitigen Prüfverfahren war es notwendig den CFR-Motor entsprechend umzurüsten. Um dem neuentwickelten Prüfverfahren gerecht zu werden hat der Fokus der Umbauarbeiten von Martin et al. [1] auf der Umrüstung zur inneren Gemischbildung mittels Direkteinspritzung gelegen. Dies wurde mit einem aus der Großserie stammenden Injektor (siehe [Abbildung 16](#)) realisiert, welcher mit einem Kraftstoffdruck von bis zu 120 bar einspritzen kann. Zusätzlich wurden an wichtigen Positionen im CFR-Motor Temperatursensoren appliziert und darüber hinaus die veraltete Klopfdetektion mittels eines Membrandrucksensors von einer piezoelektrischen Indizierdruckmesstechnik abgelöst. [1]; [61]

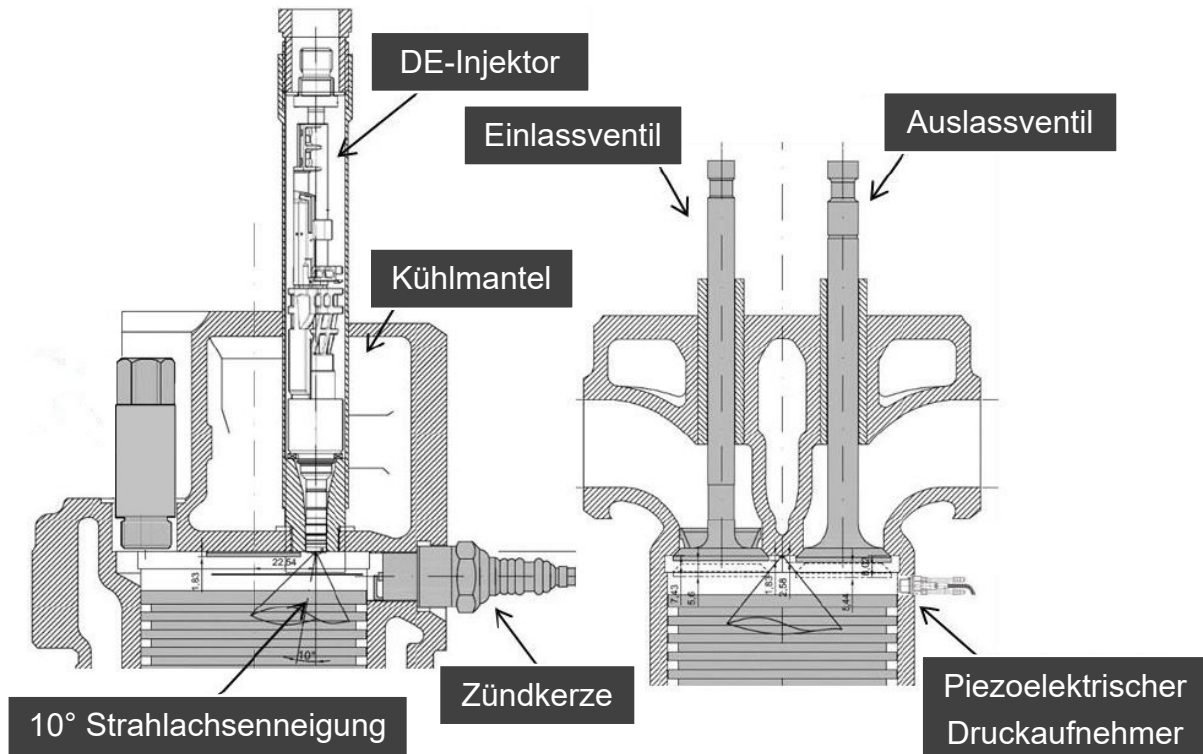


Abbildung 16: Schnittdarstellung des modifizierten CFR-Motors, [4]

Neben den Umrüstungen am CFR-Motor, war es gewünscht die Testprozedur weitgehend zu automatisieren. Dies wurde mit einem Zusatzgerät, dem sogenannten Fuel Classification System (FCS) realisiert. In Abbildung 17 ist der umgerüstete CFR-Motor und das beigeestellte FCS-System dargestellt.

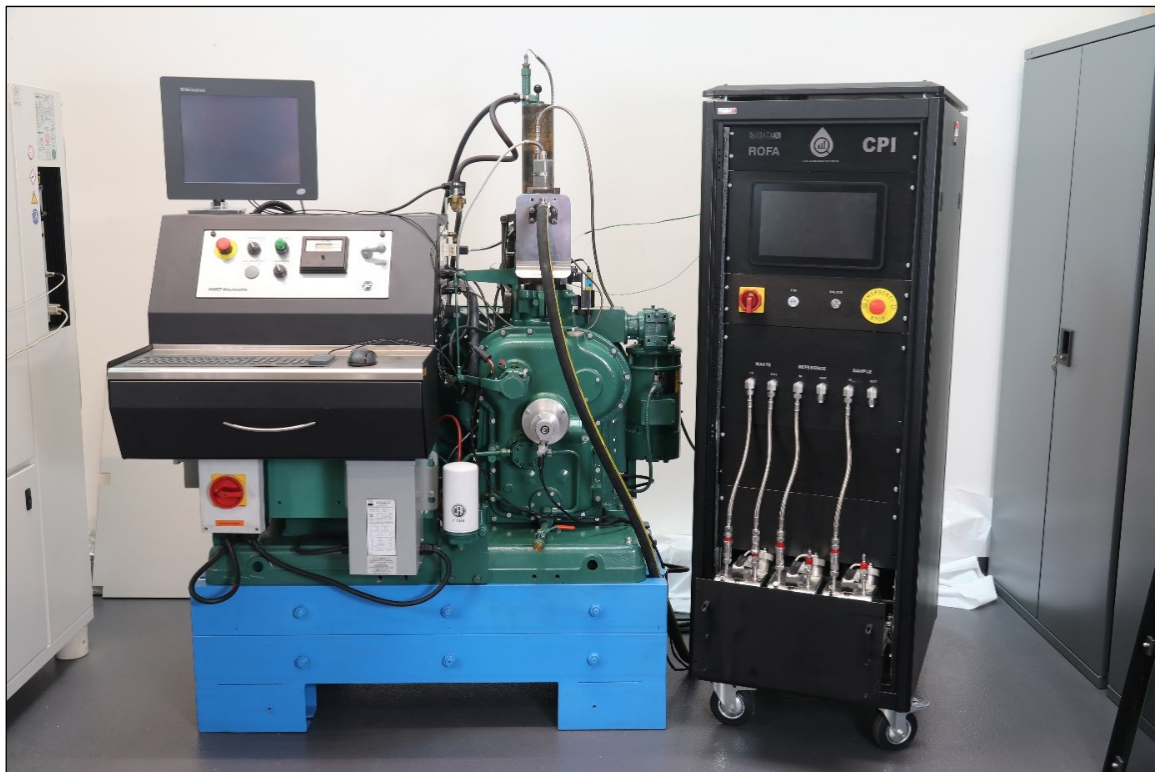


Abbildung 17: modifizierter CFR-Motor inkl. FCS-System

Das FCS-System verfügt über einen integrierten Real-Time Prozessor und zur Bedienung ein Touchscreen Display mit neu entwickeltem User-Interface. Die Zündung und die Kraftstoffversorgung werden fortan auch mit dem FCS-System gesteuert. Das System der Kraftstoffversorgung beinhaltet neben der Direkteinspritzung am CFR-Motor eine Hochdruckpumpe, Kraftstoffkühler und drei Probenbehälter. Der erste Behälter steht dem Referenzkraftstoff (Isooktan), der zweite Behälter dem Probenkraftstoff zur Verfügung. Der dritte Behälter wird benötigt, da automatisch nach jedem Kraftstoffwechsel oder dem Wechsel von Referenz- zur Probenmessung eine Spülung durchgeführt wird. Diese Durchspülung hat das Ziel eine Durchmischung verschiedener Kraftstoffsorten in den Leitungen zu minimieren.

Um eine gute Annäherung der In-Zylinder-Bedingungen der CPI-Methode an moderne Downsizing-Motoren zu gewährleisten, entschied man sich für eine moderate Aufladung der Ansaugluft. Zu diesem Zweck wurde die Luftversorgung des CFR-Motors um eine mechanische Ladeeinheit erweitert. Diese besteht aus einem Kompressor mit integriertem Ladeluftkühler sowie einer Ansaugluftvorwärmeeinheit, um konstante Ansaugluftbedingungen zu gewährleisten. Abbildung 18 zeigt den verwendeten Kompressor.



Abbildung 18: integrierter Kompressor im FCS-System

Auf Basis der MOZ-Prüfung wurden im Zuge eines Forschungsprojektes schließlich drei neue Prüfverfahren entwickelt. Einerseits das DOZ-Verfahren (Direkteinspritz-Ok-tanzahl) zur Erforschung der Klopffestigkeit bei Direkteinspritzung und andererseits das CPI-Verfahren (Compression Pre-Ignition) zur Erforschung von Kompressionszündungen in der Gasphase sowie das HSPI-Verfahren (Hot Spot Pre-Ignition) zur Klassifizierung von Glühzündungsereignissen. Die Weiterentwicklung des für die neue

Kennzahl notwendigen FCS in der sämtliche Hardwarekomponenten (Kraftstoffsystem, Ladeluftbereitstellung, Regel- und Auswerteelektronik) untergebracht sind, wurde 2021 abgeschlossen und die Prüfmethode sowie die Prüfanlage in einem Normenentwurf festgehalten. Um Aussagen zur Präzision und Vergleichbarkeit des Analyseverfahrens zu erhalten, wurden zwei weitere FCS-Anlagen unter Mitwirkung des IFA gebaut und bei Mitgliedern des Arbeitskreises „NAK Gas Phase Pre-Ignition Number“ installiert. Der Ablauf des CPI-Prüfverfahrens und die Ermittlung der zugehörigen Kennzahl wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert. Da die Messmethodik zur Validierung der DOZ- sowie der HSPI-Kennzahl für diese Untersuchungen nicht relevant sind, werden diese nicht weiter ausgeführt. Der Ablauf des CPI-Verfahrens gestaltet sich wie folgt: [61]

- I. Der CFR-Prüfmotor wird zur Referenzmessung mittels Direkteinspritzung mit klopfstem Isooktan (2,2,4-Trimethylpentan) unter Volllast betrieben. Ferner ist die Umsatzschwerpunktlage (MFB50%) auf 35°KW nach ZOT bei einer Kompression ( $\varepsilon$ ) von 8,5 einzustellen und die Ansauglufttemperatur konstant bei 30°C zu halten. All dies wird über das FCS vollautomatisch geregelt.
- II. Anschließend wird die Verdichtung automatisiert schrittweise erhöht, bis zu dem Zeitpunkt, ab dem die erste Vorentflammung auftritt. Die Schrittweite beträgt fünf DCR (Digital Counter Reading) und die Haltedauer pro Schritt beträgt fünf Sekunden. Der DCR-Wert kann mittels Gleichung (5) in ein geometrisches Verdichtungsverhältnis  $\varepsilon$  umgerechnet werden. Die zuletzt erreichte Verdichtung wird vermerkt und zur Berechnung der CPI-Kennzahl verwendet. Die Schwelle bei der eine Vorentflammung als solche vermerkt wird, behilft sich des 5% Energieumsatzpunktes (Brennbeginn). Die Detektionsschwelle ist in Gleichung (6) definiert.
- III. Ist die Referenzmessung mit Isooktan abgeschlossen, so kann die in I und II beschriebene Vorgehensweise mit anderen Kraftstoffen wiederholt werden. Anhand der erhaltenen Kennwerte wird die CPI-Kennzahl der unterschiedlichen Kraftstoffe berechnet (Gleichung (7)). Dem zu Beginn verwendeten Isooktan-Referenzkraftstoff wird definitionsgemäß ein fixer CPI-Wert von 100 zugewiesen.

$$\varepsilon = \frac{6345}{1850 - DCR} + 1 \quad (5)$$

$\varepsilon$  geometrisches Verdichtungsverhältnis

$DCR$  Digital Counter Reading

$$\text{Detektionsschwelle} = \text{MFB05\%}_{VE} \text{ vor ZZP} \quad (6)$$

$\text{MFB05\%}_{VE}$  Punkt 5% umgesetzter Gemischmasse (Brennbeginn)

$\text{ZZP}$  Zündzeitpunkt

$$\text{CPI} = \text{CPI}_{\text{Isooktan}} + (\varepsilon_{\text{Probe}} - \varepsilon_{\text{Isooktan}}) * 20 \quad (7)$$

$\text{CPI}_{\text{Isooktan}}$  CPI-Kennzahl von klopfestem Isooktan [-]

$\varepsilon_{\text{Probe}}$  Verdichtung der Kraftstoffprobe [-]

$\varepsilon_{\text{Isooktan}}$  Verdichtung des Isooktan Kraftstoffes [-]

Die Betriebsbedingungen sind in Tabelle 4 den Betriebsbedingungen der ROZ/MOZ-Prüfung gegenübergestellt. Den größten Unterschied der CPI-Messung gegenüber des bekannten ROZ/MOZ-Messverfahren stellt – wie bereits erläutert – die Umrüstung auf eine Direkteinspritzung dar. Ferner wird der Zündzeitpunkt nun entsprechend der Umsatzzwerpunkt-lage (MFB50%) eingestellt, sodass sich für jenen Punkt ein fixer Wert gemäß Tabelle 4 einstellt. Der Ladedruck entspricht von nun an nicht mehr dem atmosphärischen Luftdruck, sondern wird mittels des externen Verdichters auf 1100 Millibar (absolut) erhöht. Die restlichen veränderten Parameter sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Betriebsbedingungen der CPI-Kraftstoffprüfung den Bedingungen der etablierten ROZ/MOZ-Kraftstoffprüfung gegenübergestellt, [58]; [59]; [61]

Motorbetriebsbedingung		ROZ	MOZ	CPI
Gemischbildung	[-]	Vergaser	Vergaser	DE
Drehzahl	[min <sup>-1</sup> ]	600	900	900
Zündzeitpunkt	[°KW vor ZOT]	konstant	f(ε)	f(MFB50%)
MFB50%	[°KW nach ZOT]	f(ZZP)	f(ZZP)	35
Ansauglufttemperatur	[°C]	52	38	30
Gemischtemperatur	[°C]	-	149	-
Ladedruck	[mbar absolut]	-	-	1100
Luft-Kraftstoff-Verhältnis	[-]	variabel	variabel	1
Einspritzende	[°KW vor ZOT]	-	-	203
Kraftstoffraildruck	[bar]	-	-	60
Verdichtungsverhältnis	[-]	variabel	variabel	variabel



## 4.2 Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer

Die zweite Prüfmethode zur Kraftstoffcharakterisierung hinsichtlich des Vorentflammungsverhaltens beruht auf der Untersuchung des Selbstzündverhaltens der Kraftstoffe in einer Konstantvolumenbrennkammer. Mittels des sogenannten Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer (AFIDA) wird Kraftstoff über einen Piezoinjektor in eine beheizte und mit Druck beaufschlagte Brennkammer eingespritzt. Ursprünglich für Dieselmotorkraftstoffe entwickelt, entzünden sich die Kraftstoffe ohne Fremdzündung im Brennraum selbstständig und lassen Rückschlüsse auf die Zündverzugszeit zu. Aus dem Vergleich der Zündverzugszeit des Probenkraftstoffes und eines Referenzkraftstoffes (Isooktan (2,2,4-Trimethylpentan)) wird die sogenannte CVPI-Kennzahl (Constant Volume Pre-Ignition) ermittelt. Der prinzipielle Aufbau des AFIDA ist anhand einer Schemaskizze in [Abbildung 19](#) zu sehen. [4]

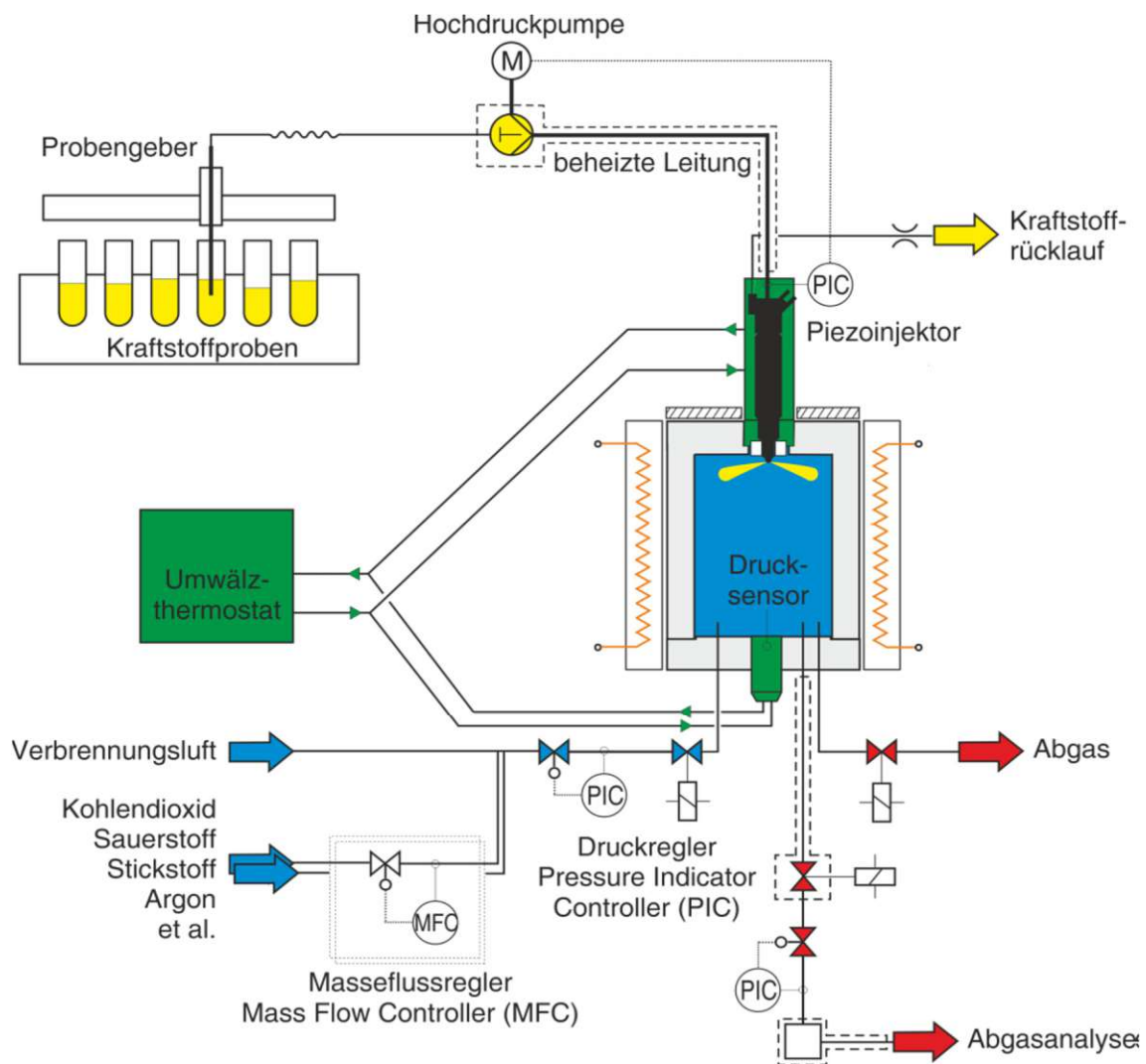


Abbildung 19: Schematischer Aufbau des AFIDA, [4]

Abbildung 20 zeigt ein aufgebautes AFIDA Gerät. Hierbei ersichtlich ist das Karussell mit den Probenbehältern, der Piezoinjektor (blau) sowie die Hochdruckpumpe (schwarz) am oberen Ende der Brennkammer.



Abbildung 20: AFIDA Gerät, [63]

Der Ablauf des CVPI-Verfahrens gestaltet sich wie folgt:

- I. Vor dem regulären Prüfzyklus findet eine Reinigung des Systems statt, bei der die Injektoren, die Kraftstoffleitungen und der Brennraum gespült beziehungsweise mit Druckluft beaufschlagt werden.
- II. Anschließend wird die Brennkammer mit den definierten Testbedingungen (siehe Tabelle 5) konditioniert und bei stabilen Bedingungen ein Teil der Kraftstoffprobe in den Brennraum eingespritzt. Diese Routine wird mindestens 12-mal wiederholt und bei jedem Durchgang automatisch der Zündverzug mittels eines Staudrucksensors bestimmt. Der Zündverzug errechnet sich aus der Zeitspanne vom Beginn des Einspritzimpulses bis zu jenem Zeitpunkt, bei dem der Luftdruck in der Prüfkammer den in den Testbedingungen definierten Schwellenwert erreicht hat.

- III. Sind zwölf Zyklen absolviert, werden diese statistisch auf Ausreißer kontrolliert und bei einer (oder mehreren) fehlerhaften Messung wird (werden) jene Messung(en) wiederholt. Sollte der Fall auftreten, dass weniger als 10 Messungen als gültig gewertet werden, so ist die gesamte Prüfung zu wiederholen. Die gemessenen Zündverzugszeiten werden nun gemittelt und die CVPI-Kennzahl daraufhin automatisiert ausgegeben. Die Berechnung erfolgt anhand einer Interpolation mittels einer simplen Geraden, wobei 0 ms Zündverzugszeit -30 CVPI entsprechen und die ermittelte Zündverzugszeit des Referenzkraftstoffes (Isooktan) einem CVPI-Wert von 100 entspricht.

Tabelle 5: Betriebsbedingungen der CVPI-Kraftstoffprüfung, [4]

Betriebsbedingung		CVPI
Brennraumkammerdruck	[bar]	20
Brennraumkammertemperatur	[°C]	700
Einspritzdruck	[bar]	1000
Einspritzzeit	[ms]	1,2
Druckschwellenwert	[bar]	1,5

Da diese Methodik ursprünglich zur Charakterisierung von Dieselmotoren entwickelt wurde, herrscht in der Brennkammer abhängig vom verwendeten Kraftstoff ein mittleres Luft-Kraftstoff-Verhältnis von in etwa 4, wobei durch die Inhomogenität der Ladung an lokalen Stellen ein weitaus geringeres Luft-Kraftstoff-Verhältnis herrscht. Aus diesem Grund stellt der hier gemessene Zündverzug eine Kombination aus chemischem und physikalischem Zündverzug dar. Der physikalische Anteil entspricht dabei der Zeitspanne vom Einspritzbeginn bis (lokal) ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch vorliegt.

Abschließend ist zum besseren Verständnis in Abbildung 21 ein Druckverlauf über der Zeit aus den Untersuchungen von [4] exemplarisch dargestellt.

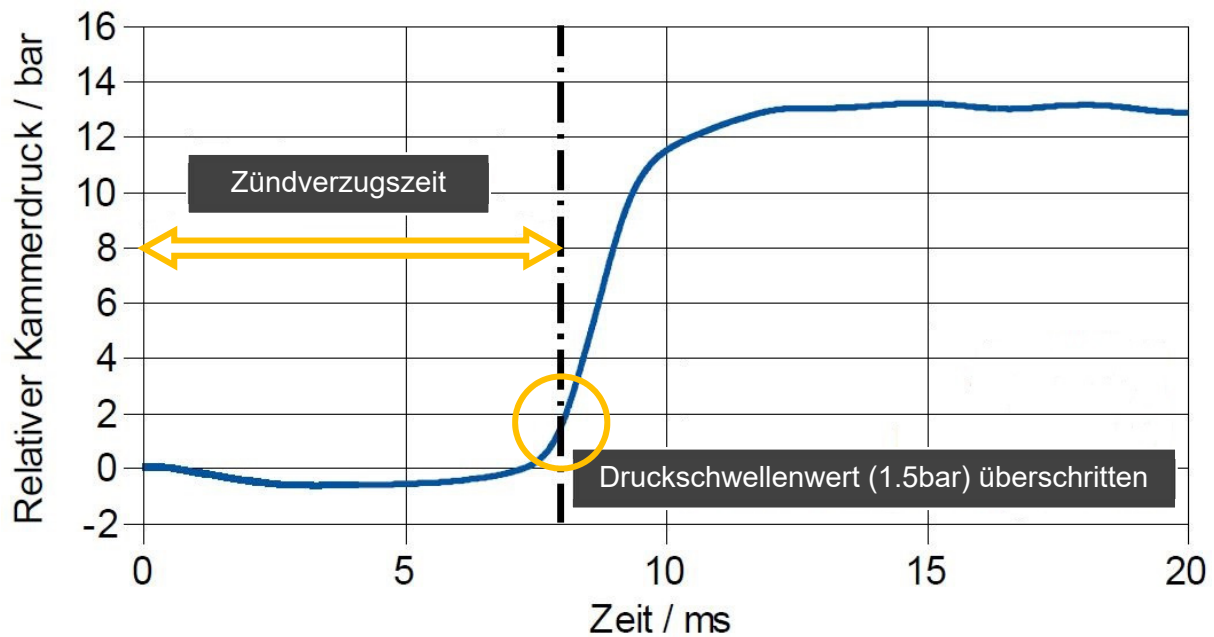


Abbildung 21: Kammerdruckverlauf gemessen am AFIDA, [4]

Anhand dem exemplarischen Druckverlauf aus Abbildung 21 kann die physikalisch-chemische Zündverzugszeit einer Kraftstoffprobe abgelesen und daraus die CVPI-Kennzahl ermittelt werden. Der Druckabfall unmittelbar nach dem Beginn der Einspritzung (0ms) ist durch die Verdampfungskühlung in der Brennkammer zu erklären. Daraufhin steigt der Kammerdruck wieder an und überschreitet nach einer gewissen Zeit die definierte Druckschwelle. Die Differenz dieses Zeitpunktes und dem Zeitpunkt des Einspritzbeginns stellt die Zündverzugszeit dar.

### 4.3 Serienmotor

Um den heutigen Bedingungen zur Charakterisierung von Verbrennungsanomalien im realen Motorbetrieb gerecht zu werden, wird als dritte Methode zusätzlich ein moderner Downsizing-Motor herangezogen. Das aktuelle Serienaggregat stammt von der Opel Automobile GmbH und wird seit 2015 in PKW-Modellen verbaut. Die technischen Spezifikationen des direkteinspritzenden Ottomotors sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Technische Spezifikationen des Serienmotors

Parameter	Einheit	Wert
Gemischbildung	[-]	DE
Leistung	[kW]	66
Bohrung	[mm]	74
Hub	[mm]	77.40
Hub/Bohrungsverhältnis	[-]	1.05
Hubraum	[ccm]	999
Anzahl der Zylinder	[-]	3
Anzahl der Ventile	[-]	12
Verdichtung	[-]	10.50

Auf Basis des obigen Versuchsträgers werden experimentelle Versuche am IFA der TU Wien durchgeführt. Bei diesen Versuchen lautet das vorrangige Ziel möglichst rasch Vorentflammungen, die infolge einer kritischen Gasphase entstehen, hervorzurufen. Diese irregulären Verbrennungsvorgänge werden durch kritische Betriebszustände begünstigt beziehungsweise hervorgerufen. Aus diesem Grund wird der Serienmotor um eine zusätzliche externe mechanische Aufladeeinheit und ein Heizelement im Saugrohr erweitert. Zur Durchführung des Testprogrammes wird der Serienmotor an eine Belastungsmaschine (Dynamometer) angekoppelt. Da Vorentflammungsereignisse hohe Druckspitzen meist gepaart mit starkem Klopfen aufweisen und dies ein enormes Schadensrisiko am Motor birgt, entschied man sich eine zusätzliche Sicherheitseinrichtung zu installieren. Zu diesem Zweck wird bei Überschreiten eines maximalen Zylinderdrucks die Kraftstoffzufuhr am entsprechenden Zylinder für wenige Sekunden unterbrochen. Dieser Abschaltmechanismus ist in Abbildung 22 anschaulich dargestellt.

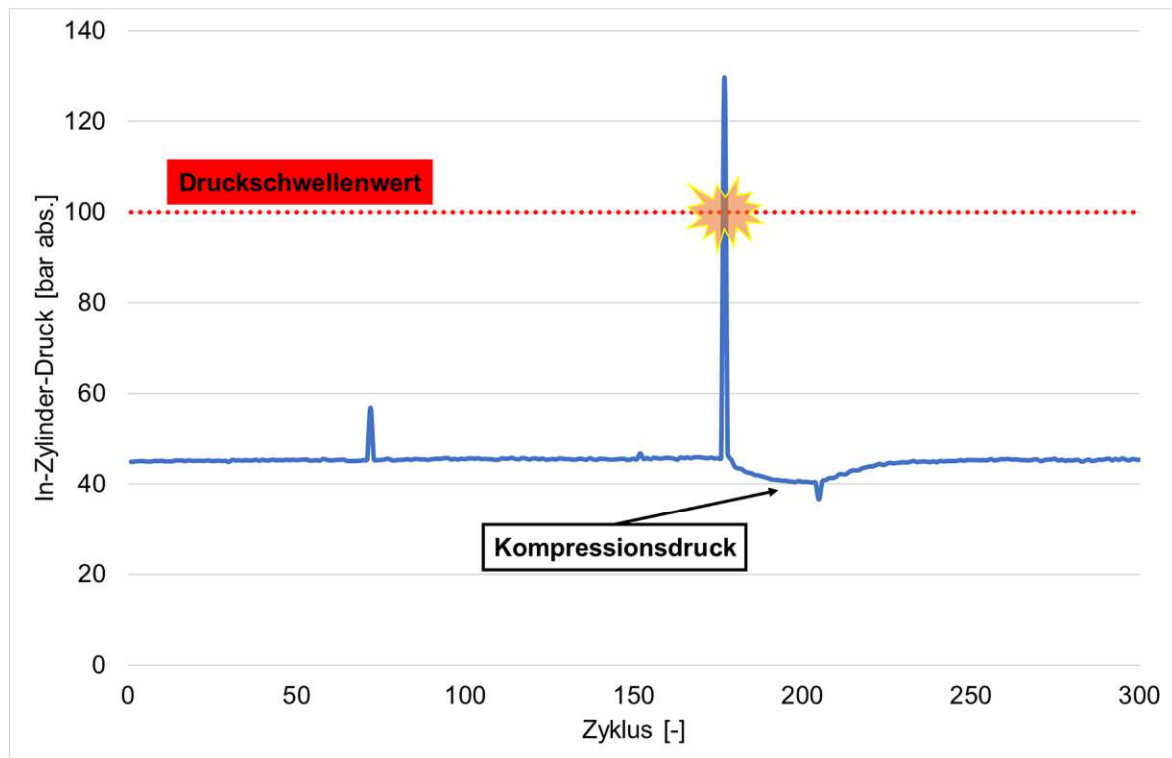


Abbildung 22: Druckverlauf am Serienmotor zur Verdeutlichung des Abschaltmechanismus

Zur Verdeutlichung der Funktion der Sicherheitseinrichtung ist in Abbildung 22 der In-Zylinder-Druck über mehrere Arbeitszyklen inklusive einem Vorentflammungszyklus zu sehen. Bei Überschreiten der definierten Druckgrenze (100 bar) im Brennraum, führt die Abschalteinrichtung zu einer Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr und somit zu einem Abfall des Drucks auf das Niveau der Kompressionskurve. Nach einer Verweildauer von etwa drei Sekunden (abhängig von der Motordrehzahl) wird die Kraftstoffeinspritzung reaktiviert. In einigen Vorentflammungsuntersuchungen wird oftmals von einer Vorentflammungswahrscheinlichkeit berichtet, sprich dem Verhältnis aus Vorentflammungszyklen zu regulären Zyklen innerhalb einer gewissen Anzahl von Messzyklen. Diese Methodik ist aufgrund der eingesetzten Sicherheitsabschaltung nicht möglich, da durch den Druckabfall über mehrere Arbeitszyklen das Ergebnis verzerrt wird.

Abbildung 23 zeigt die gesamte Prüfstandszelle mit der verwendeten Belastungsmaschine im Vordergrund, dem Versuchsträger in der Mitte und der mechanischen Auf-ladeeinheit (Kompressor) am linken Rand der Grafik.

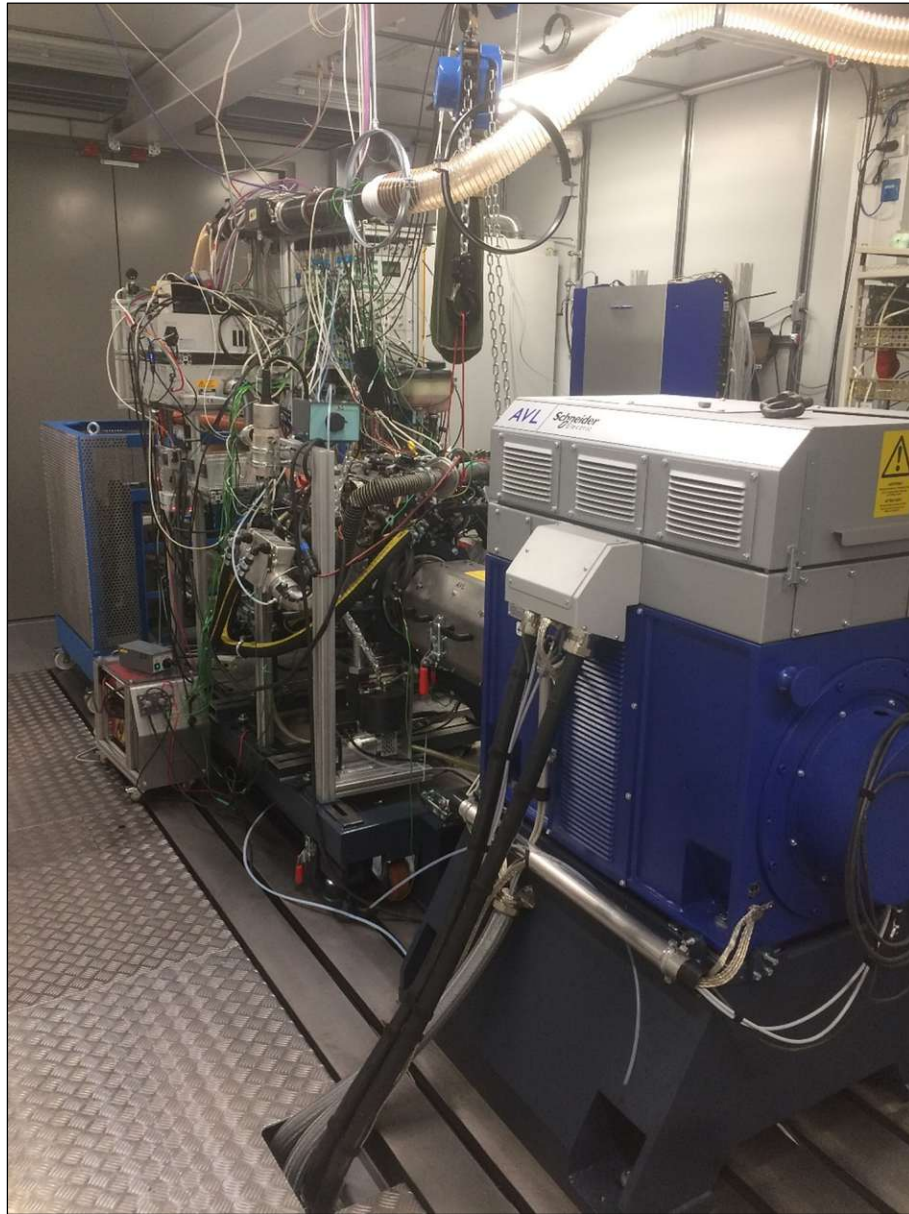


Abbildung 23: Prüfzelle am IFA der TU Wien

Um den Versuch überwachen respektive bewerten zu können sind eine Vielzahl an Temperatur- und Drucksensoren am Prüfling und dessen Peripherie installiert. Neben der Standardmesstechnik zur Temperatur- und Druckmessung ist eine Hochdruckindizierung am Vollmotor appliziert, welche den Druck im Brennraum erfasst. Ferner werden die Abgaskomponenten, die Luftmasse, die Luftzahl sowie der Kraftstoffverbrauch durch geeignete Messgeräte bestimmt. Ein Drehmomentmessaufnehmer zwischen der Belastungsmaschine und dem Versuchsträger ermöglicht die Messung von Drehmoment und Drehzahl. Ein schematischer Prüfstands Aufbau ist in [Abbildung 24](#) dargestellt. Die verwendeten Messgeräte zur Messung relevanter Größen sind in [Tabelle 7](#) ersichtlich.

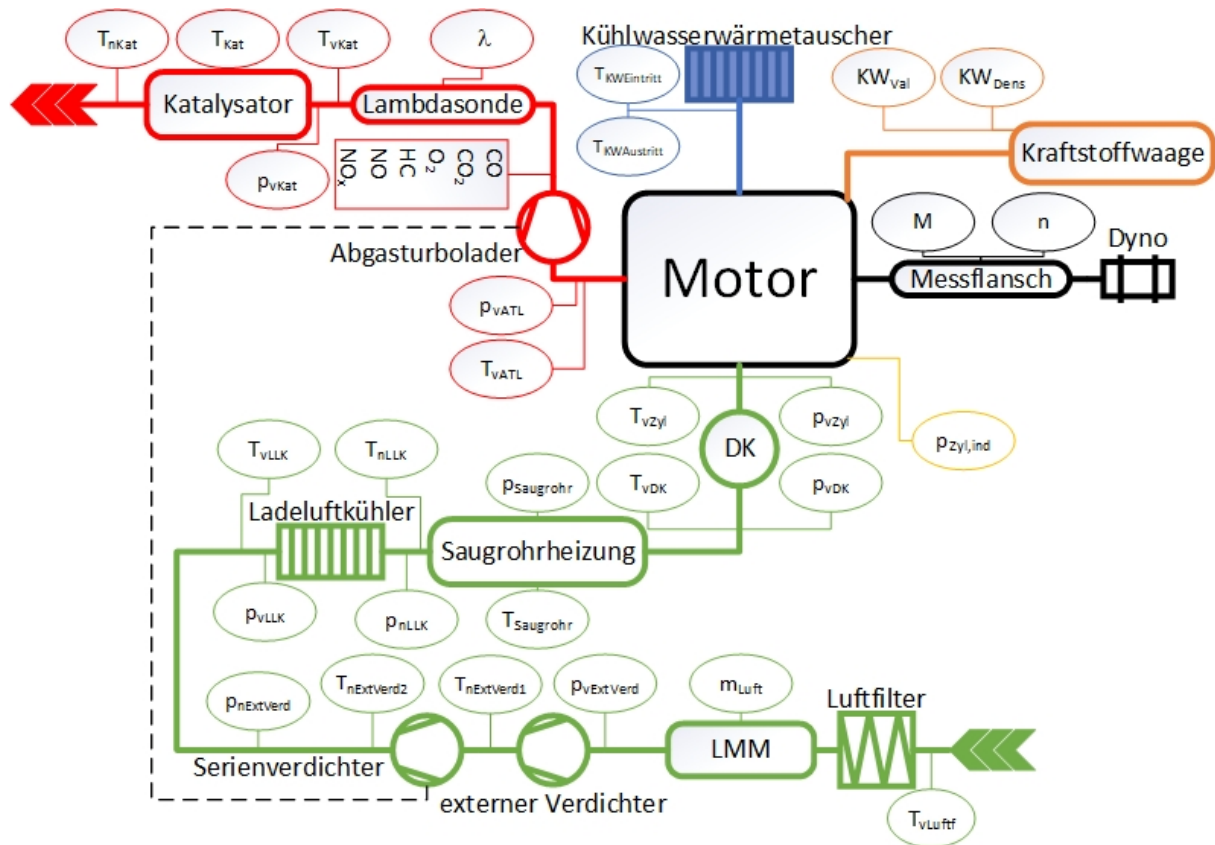


Abbildung 24: Schematischer Aufbau des Prüfstandsbaus

Tabelle 7: Messtechnik am Serienmotor

Messgerät	Bezeichnung	Messgröße
Thermoelement	RS Thermoelement Typ K	Temperatur
Druckaufnehmer	Keller PAA-21S	(Nieder-)Druck
Indiziersystem	AVL Indimodul 622 GigaBit	(Hoch-)Druck
Druckaufnehmer	Kistler 6061B	(Hoch-)Druck
Ladungsverstärker	Kistler 5011	(Hoch-)Druck
Durchflussmesser	ABB Sensyflow FMT700-P	Luftmasse
Lambdasonde	NGK Breitbandlambdasonde	Luftzahl
Kraftstoffwaage	AVL Fuel Mass Flow Meter 735S	Kraftstoffdaten
Kraftstoffwaage	AVL Fuel Temperature Control 753C	Kraftstoffdaten
Kohlenmonoxidanalysator	Siemens Ultramat 6	CO
Kohlendioxidanalysator	Siemens Ultramat 6	CO <sub>2</sub>
Sauerstoffanalysator	Siemens Oxymat 6	O <sub>2</sub>
Flammenionisationsdetektor	Testa FID 1230 Modul	HC
Chemilumineszenzdetektor	Eco Physics CLD 700	NO <sub>x</sub>



Das vorrangige Ziel besteht darin, rasch Ergebnisse (analog zum ROZ/MOZ/CPI Messverfahren) zu erhalten. Somit werden, gegensätzlich zu üblichen Vorentflam- mungsuntersuchungen, bei denen ein längerer Volllastbetrieb stattfindet, (über-)kriti- sche Zustände mittels der externen Saugrohrheizung und des externen Verdichters hervorgerufen und damit Ressourcen eingespart. Die eingestellten (statischen) Be- triebsparameter des Vollmotors während der Messungen sind in Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: statische Betriebsparameter der Untersuchungen am Serienmotor

Parameter	Einheit	Wert
Luft-Kraftstoff-Verhältnis	[-]	1.00
Einlasssteuerzeit bezogen auf 1mm Ventilhub	[°KW nach LWOT]	10
Auslasssteuerzeit bezogen auf 1mm Ventilhub	[°KW vor LWOT]	10
Kraftstoffdruck	[bar]	120
Einspritzbeginn	[°KW vor ZOT]	265
Umsatzschwerpunkt	[°KW nach ZOT]	45

Um unterschiedliche Verhaltensweisen des Vollmotors bei Veränderung der Einlass- kanaltemperatur beziehungsweise des Saugrohrdruckes identifizieren zu können, hat man sich dazu entschieden drei Betriebspunkte je Kraftstoff in den Messplan zu integ- rieren. Diese Betriebspunkte sind in Tabelle 9 aufgelistet. Im Betriebspunkt 1 wird die Temperatur in 5°C Schritten, bei den beiden anderen Betriebspunkten der Ladedruck um jeweils 50 mbar erhöht. Eine Stufe wird unabhängig des Betriebspunktes drei Mi- nuten gehalten. Das Experiment wird bei Erreichen der Definitionskriterien für eine Vorentflammung abgeschlossen und die letzte angefahrne Stufe als Grenzwert be- trachtet. Ferner gilt es zu erwähnen, dass der Messplan eine Konditionierung des Prüf- lings nach jedem Kraftstoffwechsel vorsieht, um etwaige Durchmischungen des Kraft- stoffes ausschließen zu können.

Tabelle 9: Betriebspunkte der Untersuchungen am Serienmotor

Betriebspunkt	Drehzahl [U/min]	Ladedruck [mbar]	Einlasskanaltemperatur [°C]
1	1500	2000	variabel
2	1500	variabel	100
3	1250	variabel	95

Um einen Verbrennungszyklus als Vorentflammung zu definieren, behilft man sich folgender Definitionskriterien:

$$p_{max,VE} > 100 \text{ bar} \quad (8)$$

$$MFB05\%_{0VE} \text{ vor ZZP} \quad (9)$$

$$MFB05\%_{0VE} < \mu_{MFB05\%} - 4.7 * \sigma_{MFB05\%} \quad (10)$$

$p_{max,VE}$	maximaler Zylinderdruck
$MFB05\%_{0VE}$	Punkt 5% umgesetzter Gemischmasse (Brennbeginn)
$\mu_{MFB05\%}$	Mittelwert des MFB05% der letzten 750 Verbrennungszyklen
$\sigma_{MFB05\%}$	Standardabweichung des MFB05% der letzten 750 Verbrennungszyklen
ZZP	Zündzeitpunkt

Somit dienen der maximale Zylinderdruck (p), der Zündzeitpunkt (ZZP) und der Zeitpunkt 5 % umgesetzter Gemischmasse (MFB05%) als Kriterium für einen Vorentflammungszyklus. Experimente zu Vorentflammungen haben gezeigt, dass der Zylinderdruck als Kriterium allein nicht ausreicht, deshalb wurde abseits des Maximaldruckes im Brennraum zusätzlich der Brennbeginn betrachtet. Der Brennbeginn wird einerseits dem Zündzeitpunkt und andererseits dem Mittelwert abzüglich einer Toleranz (Standardabweichung) gegenübergestellt, um Verbrennungsanomalien erfolgreich zu identifizieren.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 CFR-Prüfmotor

#### Research- und Motoroktanzahl (ROZ/MOZ)

Da der genormte CFR-Motor auch zur Oktanzahlbestimmung herangezogen wird, ist in [Abbildung 25](#) das Resultat der ROZ/MOZ-Kraftstoffprüfung (gereiht nach aufsteigenden ROZ-Werten), sowie in [Abbildung 26](#) die berechnete Sensitivität dargestellt. Die Daten bezüglich der Research- und Motoroktanzahl sind einerseits durch Shell dem gelieferten Kraftstoff beigelegt und andererseits durch eine Oktanzahlmessung des IFA der TU Wien bestätigt. Eine Abweichung kann nicht festgestellt werden beziehungsweise liegt diese in dem von der Norm festgelegten Rahmen. [58]; [59]

Es ist festzuhalten, dass alle verwendeten Proben die Anforderungen der Mindestoktanzahlen laut Kraftstoffnorm DIN EN 228 erfüllen. Während vier Proben die Grenzwerte für Super-Kraftstoff erfüllen, erreicht der Probenkraftstoff PR8785 die Schwelle um als Super-Plus klassifiziert werden zu können. Die geringste Klopfestigkeit und somit die niedrigste Oktanzahl weist die Probe PR8608 auf. Diese Kraftstoffprobe beinhaltet keinerlei sauerstoffhaltige Verbindungen (Oxygenate), wodurch sich das Ergebnis einer geringen Klopfestigkeit bestätigt. Demgegenüber zeigen die restlichen vier Proben, aufgrund der Zumischung sauerstoffhaltiger Verbindungen (Ethanol, Methanol, Ether) eine höhere Klopfresistenz. Betrachtet man die chemische Zusammensetzung sticht die Probe PR8809 hervor, welche im Vergleich zu den anderen einen signifikant geringeren Anteil an aromatischen Verbindungen sowie höhere Paraffinanteile enthält. Dies führt zu einem Minimalwert der Sensitivität. Hohe Paraffinanteile, wie in der Probe PR8608, führen ebenso zu einer reduzierten Sensitivität. Im Gegenzug führen die Beimischung von sauerstoffhaltigen Verbindungen zu einer erhöhten Kraftstoffsensitivität (ausgenommen PR8809). [50]; [64]

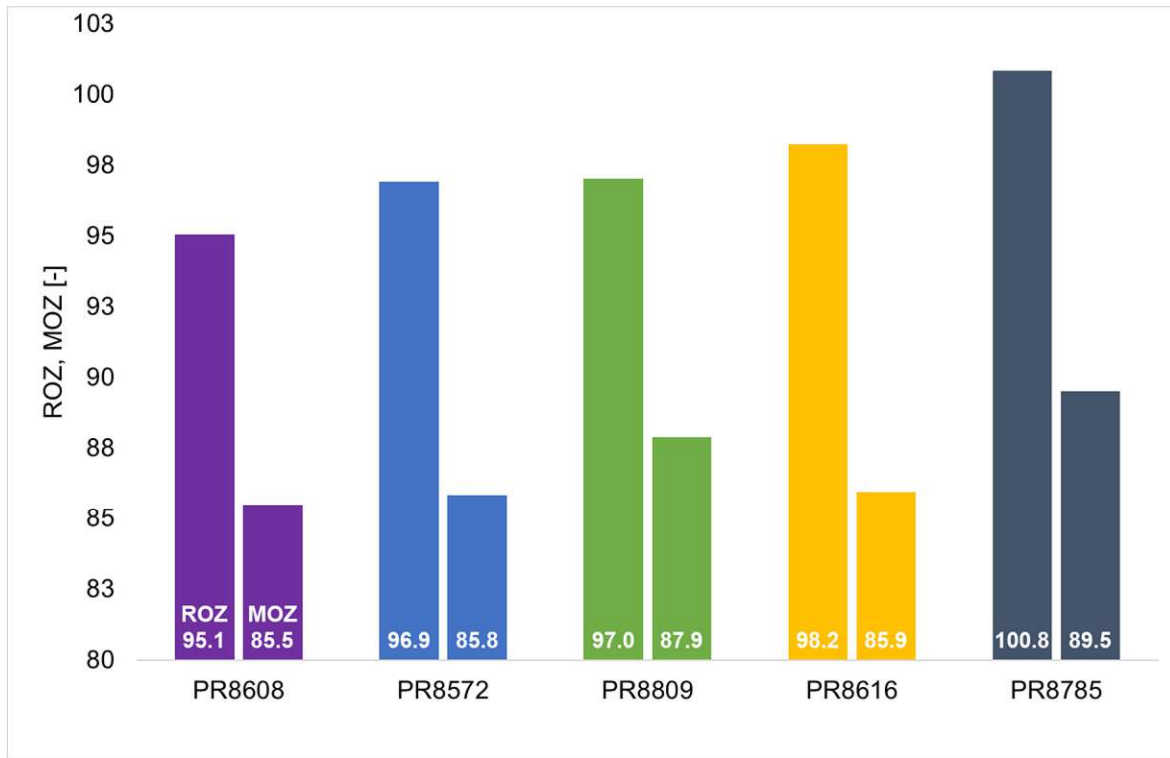


Abbildung 25: Kraftstoffbewertung anhand der Research- und Motor-Oktanzahl (ROZ/MOZ)

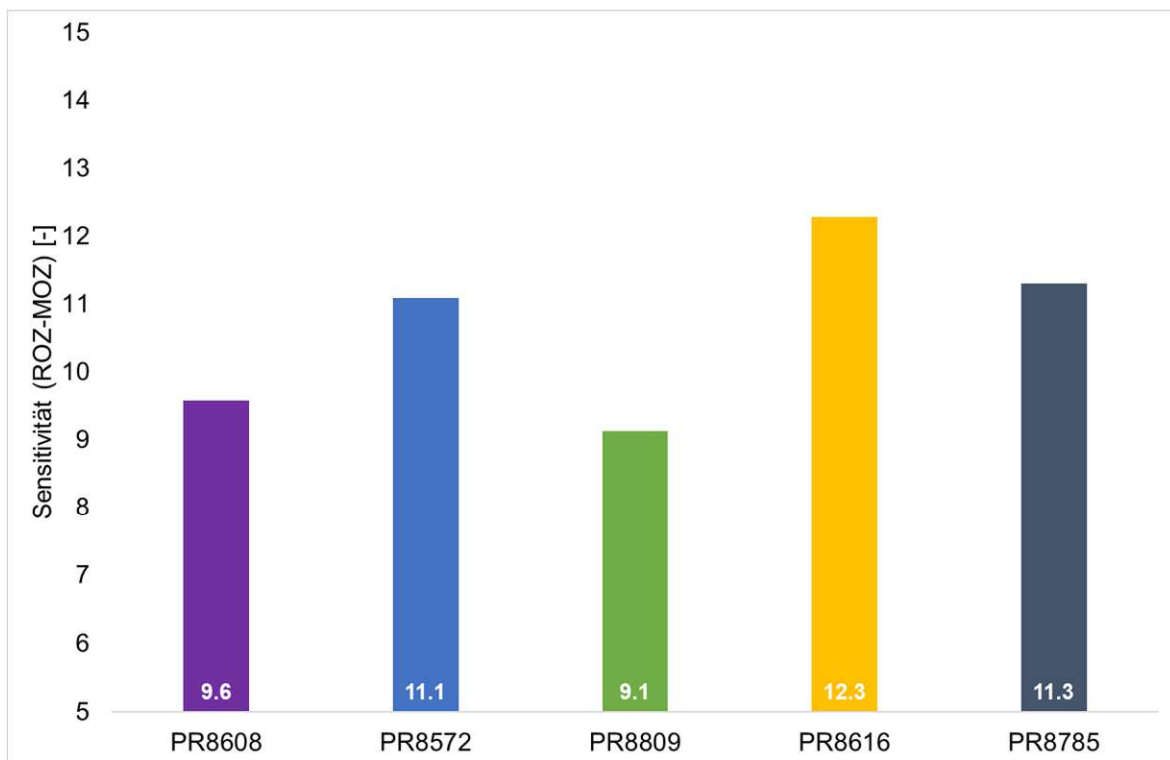


Abbildung 26: Kraftstoffbewertung anhand der Sensitivität (ROZ-MOZ)

## Compression Pre-Ignition Kennzahl (CPI)

Anhand des modifizierten CFR-Prüfmotors werden nun die Ergebnisse zur Charakterisierung der Kraftstoffe im Falle der Gasphasenzündung bereitgestellt. Dies geschieht anhand der Compression Pre-Ignition Kennzahl (CPI). Durchgeführt wurden diese Messungen einerseits am IFA der TU Wien und andererseits bei der Fa MIBÖ in Lohmar. Die Ergebnisse sind in [Abbildung 27](#) dargestellt. Ferner gilt es zu beachten, dass für einen Probenkraftstoff mindestens zwei Messreihen mit jeweils mindestens vier Messwiederholungen durchgeführt wurden. Die sich daraus ergebende Messtoleranz wird hier noch ausführlicher diskutiert.

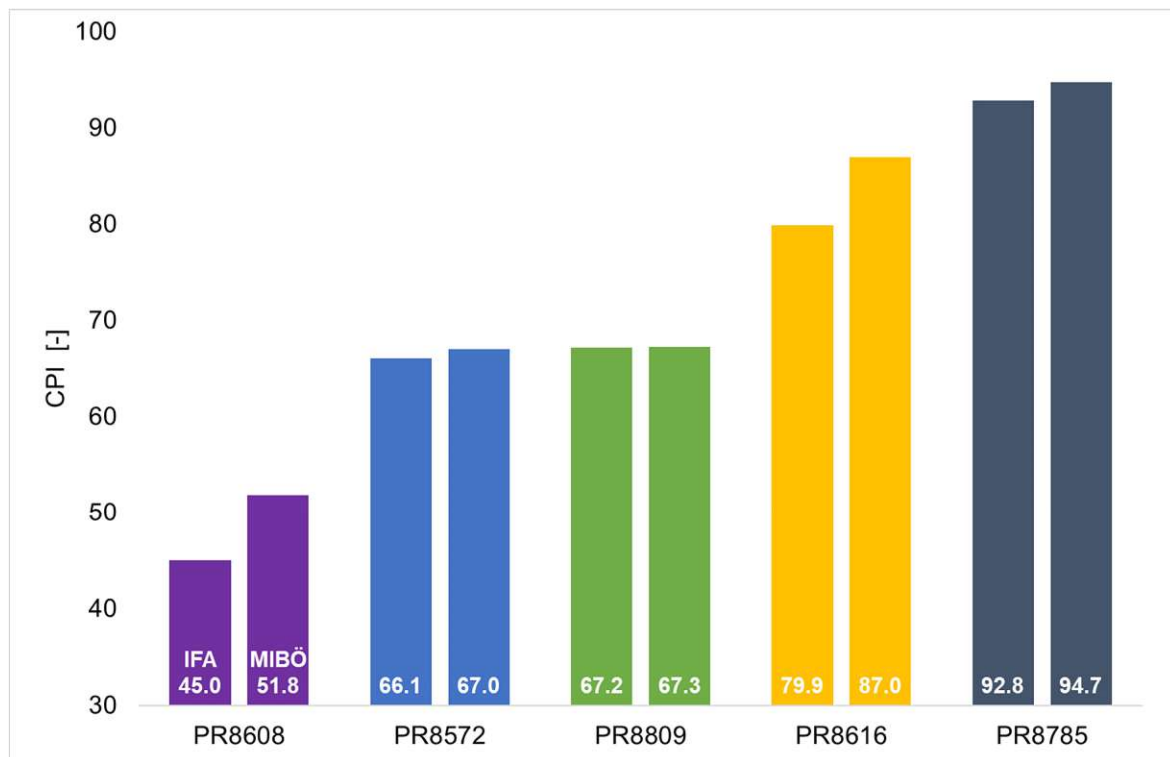


Abbildung 27: Kraftstoffbewertung anhand der Compression Pre-Ignition Kennzahl (CPI)

Auffällig und vorerst unzufriedenstellend ist die teils große Differenz der Resultate innerhalb eines Kraftstoffes des IFA und jene der Fa MIBÖ. Da Abweichungen im zwei-stelligen Prozentbereich zu beobachten sind, hat man sich dazu entschieden eine Validierung der Messmethodik beziehungsweise des Prüfverfahrens durchzuführen. Diese weiterführenden Untersuchungen mit möglichen Erklärungen für die auftretenden Abweichungen sind in Kapitel 6 ausgeführt.

Bei Betrachtung der Messresultate der CPI-Kennwerte (Abbildung 27) fällt auf, dass die Reihung der Kraftstoffe ident zu den Ergebnissen der ROZ-Messung (Abbildung 25) ist. Wiederum ist zu verzeichnen, dass die sauerstoffhaltigen Kraftstoffe eine bessere Performance aufweisen als jene Probe ohne Zumischung von Alkohol oder Ether (PR8608). Weiters fällt auf, dass der Wertebereich der CPI-Kennzahlen zwar den

Wertebereich der Oktanzahlen einschließt, jedoch signifikant größer ausfällt. Dieser Tatsache geschuldet ist eine höhere Messtoleranz dieser Methode zu relativieren. Eine Vergleichbarkeit respektive Wiederholbarkeit wie sie bei der Oktanzahlmessung nach [58]; [59] zur Anwendung kommt, kann beim CPI-Verfahren nicht erreicht werden. Eine Möglichkeit zur Beschreibung der Messtoleranz ist die Standardnormalverteilung mithilfe des Mittelwertes  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$ . Das Intervall wurde mit  $\pm 2\sigma$  begrenzt, wovon davon auszugehen ist, dass rund 95% aller Messwerte sich in diesem Intervall befinden. Eine statistisch vollständig belastbare Auswertung ist ohnehin nicht möglich, da die Stichprobe (acht Messungen pro Kraftstoff) hierfür zu gering ist. Die Messtoleranzen des CPI-Verfahrens sind in Tabelle 10 dargestellt, der Wertebereich der untersuchten Proben ist in Tabelle 11 ersichtlich. [65]

Tabelle 10: Messtoleranzen der untersuchten Kraftstoffproben am CPI-Messverfahren

Probe/Messtoleranz	IFA	MIBÖ
PR 8608	45.0 $\pm$ 2.8	51.8 $\pm$ 5.8
PR 8572	66.1 $\pm$ 3.7	67.0 $\pm$ 6.5
PR 8809	67.2 $\pm$ 5.1	67.3 $\pm$ 5.3
PR 8616	79.9 $\pm$ 4.4	87.0 $\pm$ 7.4
PR 8785	92.8 $\pm$ 5.0	94.7 $\pm$ 8.4

Tabelle 11: Wertebereich und zugehörige Differenz der ermittelten Kraftstoffkennzahlen (ROZ/MOZ/CPI) am CFR-Forschungsmotor

CFR-Prüfverfahren	Wertebereich der Messdaten	Spannweite der Messdaten (max-min)
CPI	45.0 bis 94.7	49.8
ROZ	95.1 bis 100.8	5.7
MOZ	85.5 bis 89.5	4.0

## 5.2 Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer

Im Rahmen der Untersuchungen in der Konstantvolumenbrennkammer sind nun die Ergebnisse in [Abbildung 28](#) dargestellt. Diese Messreihe wurde mit identen Betriebsparametern (siehe Tabelle 5) aufgenommen. Die Reihung in [Abbildung 28](#) wurde analog zu den Ergebnissen von den Untersuchungen am CFR-Motor gewählt.

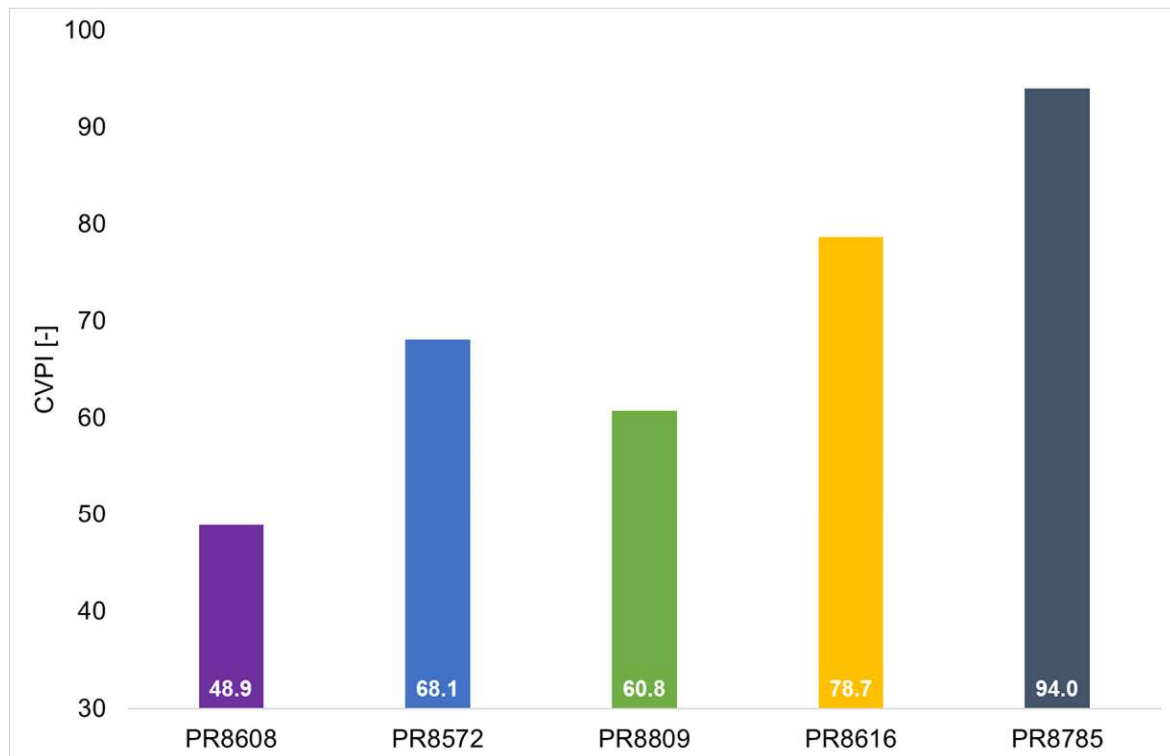


Abbildung 28: Kraftstoffbewertung anhand der Constant Volume Pre-Ignition Kennzahl (CVPI)

Die berechneten CVPI-Kennwerte aus der chemisch-physikalischen Zündverzugszeit befinden sich im selben Wertebereich wie die vorhin dargestellten CPI-Daten. Da für diese Prüfmethode noch keine einheitlichen Betriebsparameter (beispielsweise Temperatur und Druck in der Brennraumkammer) in einem Normentwurf festgelegt sind und diese vorerst an jene der CPI-Messungen angepasst werden, ergibt sich in [Abbildung 28](#) eine nahezu idente Reihenfolge wie bei den CPI-Messdaten. Lediglich die zwei Proben mit der Nummer PR8572 und PR8809 unterscheiden sich hier. Dieser Tatsache geschuldet müssen weitere Forschungsaktivitäten hierzu intensiviert werden, um belastbare Ergebnisse zu erhalten.

## 5.3 Serienmotor

### Grenzwerttemperaturen und Grenzwertdrücke des Serienmotors

Den Abschluss der Messergebnisse bilden jene des modernen Downsizing-Motors ab, welche in [Abbildung 29](#), [Abbildung 30](#) und [Abbildung 31](#) dargestellt sind. Die abgebildete Reihenfolge der untersuchten Kraftstoffproben entspricht jener der ROZ/MOZ/C(V)PI-Ergebnisse. Zur Analyse der Grenzwerte werden entsprechend des Betriebspunktes entweder die Einlasskanaltemperatur oder der Ladedruck gekennzeichnet, ab dem das (vorhin definierte) Kriterium für eine Vorentflammung erfüllt ist.

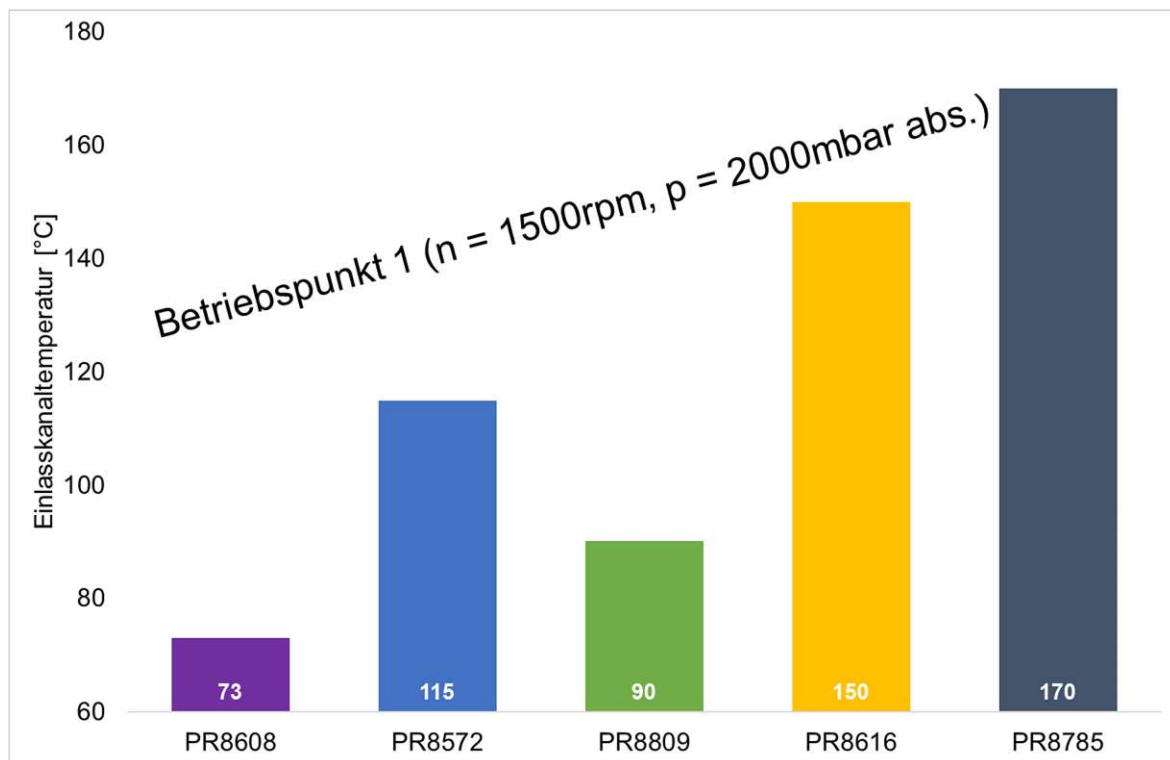


Abbildung 29: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 1

Abbildung 31 zeigt, dass die Reihenfolge während Betriebspunkt 3 ident, bei den anderen beiden Betriebspunkten (Abbildung 29 und Abbildung 30) die Reihenfolge sich im Vergleich zur ROZ und CPI-Messung unterscheidet. Ferner fällt bei Miteinbeziehung der chemischen Zusammensetzung auch hier auf, dass jener Kraftstoff ohne sauerstoffhaltige Verbindungen (PR8608) die geringsten Werte liefert. Zusätzlich ist zu vermerken, dass die geringen Anteile an Aromaten bei der Probe PR8809 sich jedenfalls negativ auf die Ergebnisse des Serienmotors auswirken. In Anbetracht dessen, dass alle verwendeten Kraftstoffproben der Kraftstoffnorm DIN EN 228 entsprechen und als „marktüblich“ eingestuft sind unterscheiden sich die maximal möglichen Temperaturen beziehungsweise Druckmaxima doch erheblich.



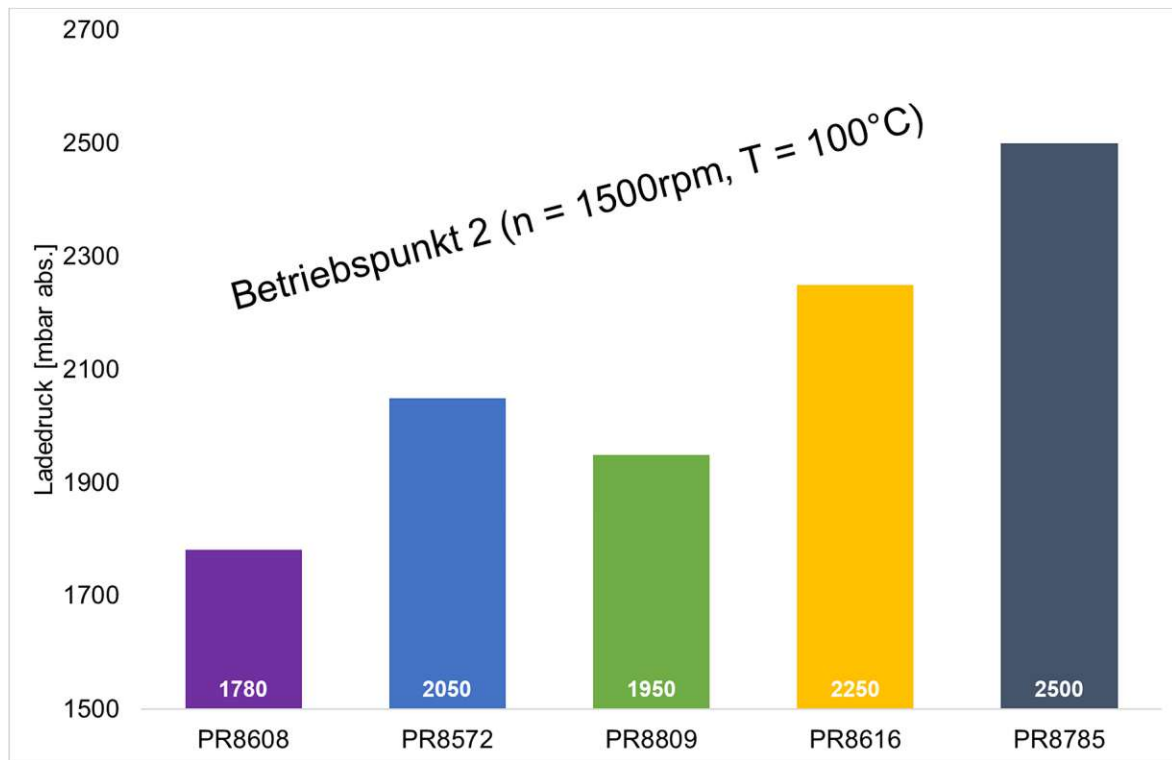


Abbildung 30: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 2

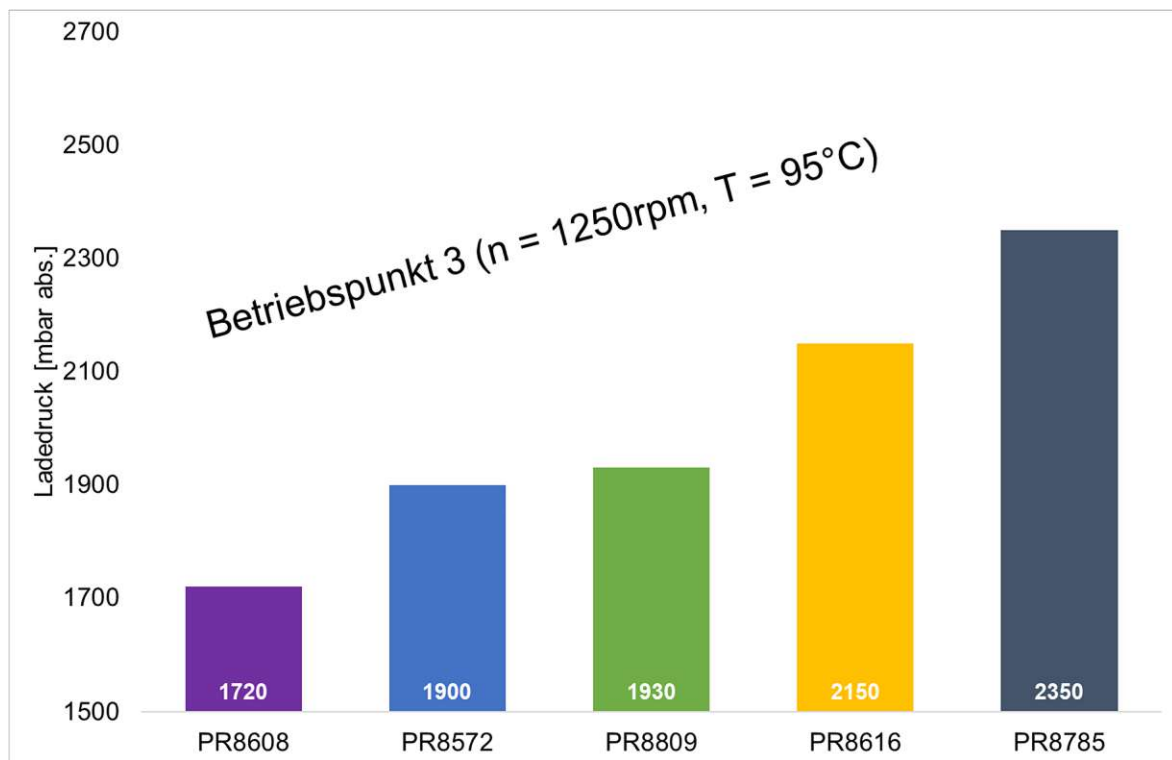


Abbildung 31: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 3

## Statistische Regressionsanalyse

Um die eben genannten Ergebnisse des Serienmotors mit jenen des CFR-Motors in Verbindung bringen respektive deren Korrelation aufzeigen zu können behilft man sich der statistischen Regressionsanalyse. Mithilfe dieses statistischen Tools soll bestimmt werden wie gut sich die Methoden am CFR-Motor für eine Charakterisierung der Probenkraftstoffe in Bezug auf deren Selbstzündungscharakterisierung eignet. Folglich wird ein kurzer Schwenk hin zur Theorie der statistischen Regression getätigt, um im Anschluss die Ergebnisse anschaulich beurteilen zu können.

Die einfache lineare Regression, ein Spezialfall der statistischen Regressionsanalyse, behandelt die Abhängigkeit einer Variable  $Y$  von einer unabhängigen Variable  $X$ . Gemäß Gleichung (11) wird somit die Zielgröße  $Y$  mithilfe der Einflussgröße  $X$ , der Störgröße  $E$  und skalaren Zahlen  $\alpha$  und  $\beta$  beschrieben und in weiterer Folge als Modell bezeichnet. Bei verschwindender Größe  $E$  tritt der Idealfall ein. Dies ist gleichbedeutend mit einem linearen Zusammenhang der Wertepaare  $X$  und  $Y$ , d.h. dass alle Punkte  $[X, Y]$  sich auf einer Gerade mit geeigneten Zahlen  $\alpha$  und  $\beta$  befinden. [66]

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + E_i \quad (11)$$

$Y_i$	Zielgröße
$X_i$	Einflussgröße
$\alpha, \beta$	unbekannte skalare Parameter
$E_i$	Störgröße

Um dieses Modell zu konkretisieren, werden die vorerst unbekanntes skalaren Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  geschätzt. Dies kann anhand unterschiedlicher Methoden erfolgen, die meist verwendete ist das Prinzip der Kleinsten Quadrate. Hierbei werden die Parameter so bestimmt, dass die Summe der quadrierten Abweichung der geschätzten Regressionswerte  $\hat{y}_i$  und der beobachteten Werte  $y_i$  laut Gleichung (12) ein Minimum darstellt. [66]

$$\sum_{i=1}^n r_i^2 \rightarrow \text{MIN}, r_i = y_i - (\alpha + \beta x_i) \quad (12)$$

Schlussendlich stellt sich die Frage wie gut die Anpassung der Regressionsgerade mittels der Regressionswerte  $\hat{y}_i$  an die beobachteten Werte  $y_i$  ist. Dies kann mithilfe des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  ausgedrückt werden, welches ein Maß für die Anpassungsgüte einer Regression darstellt. Diese Kennzahl wird gemäß Gleichung (13)

ausgedrückt und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 0 für keinen Zusammenhang und 1 für perfekten Zusammenhang des Regressionsmodelles und der beobachteten Werte steht. [66]

$$R_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

$\hat{y}_i$	geschätzte Regressionswerte
$\bar{y}$	Mittelwert der Messwerte
$y_i$	beobachtete Messwerte

Im Anschluss werden die Ergebnisse des Serienmotors anhand der soeben vorgestellten Methode diskutiert. Als Einflussgröße X fungieren die Kennzahlen aus den CFR-Messungen (ROZ, MOZ, CPI) und die abhängige Variable Y wird durch den kritischen Ladedruck sowie der kritischen Ladelufttemperatur aus den Messungen des modernen Downsizing-Motors beschrieben. [66]

### Korrelation der Ergebnisse am Serienmotor und den Kraftstoffkennzahlen

Noch bevor ein Zusammenhang zwischen physikalischen und chemischen Eigenschaften respektive der C(V)PI-Kennzahl der marktkonformen Kraftstoffproben und der Vorentflammungsreaktivität am Serienmotor gesucht wird soll sich zeigen ob die bewährten Messverfahren zur Bestimmung der Oktanzahl (ROZ, MOZ) mit den Untersuchungen am Dreizylinder-Vollmotor korrelieren. Während in [Abbildung 32](#) die Ergebnisse aller Betriebspunkte am Serienmotor in Korrelation zur Research-Oktanzahl dargestellt sind, bildet [Abbildung 33](#) die Korrelation zwischen den ermittelten kritischen Temperaturen und Drücke am Serienmotor und der Motor-Oktanzahl ab.

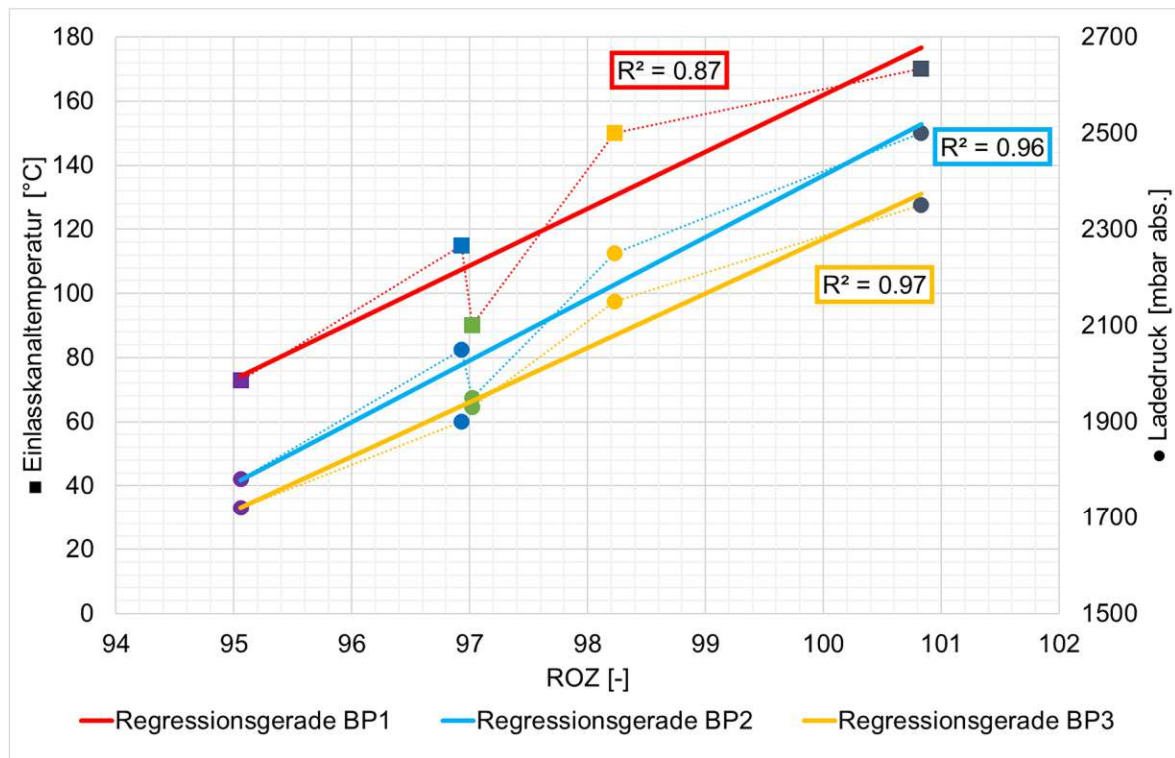


Abbildung 32: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der Research-Oktanzahl

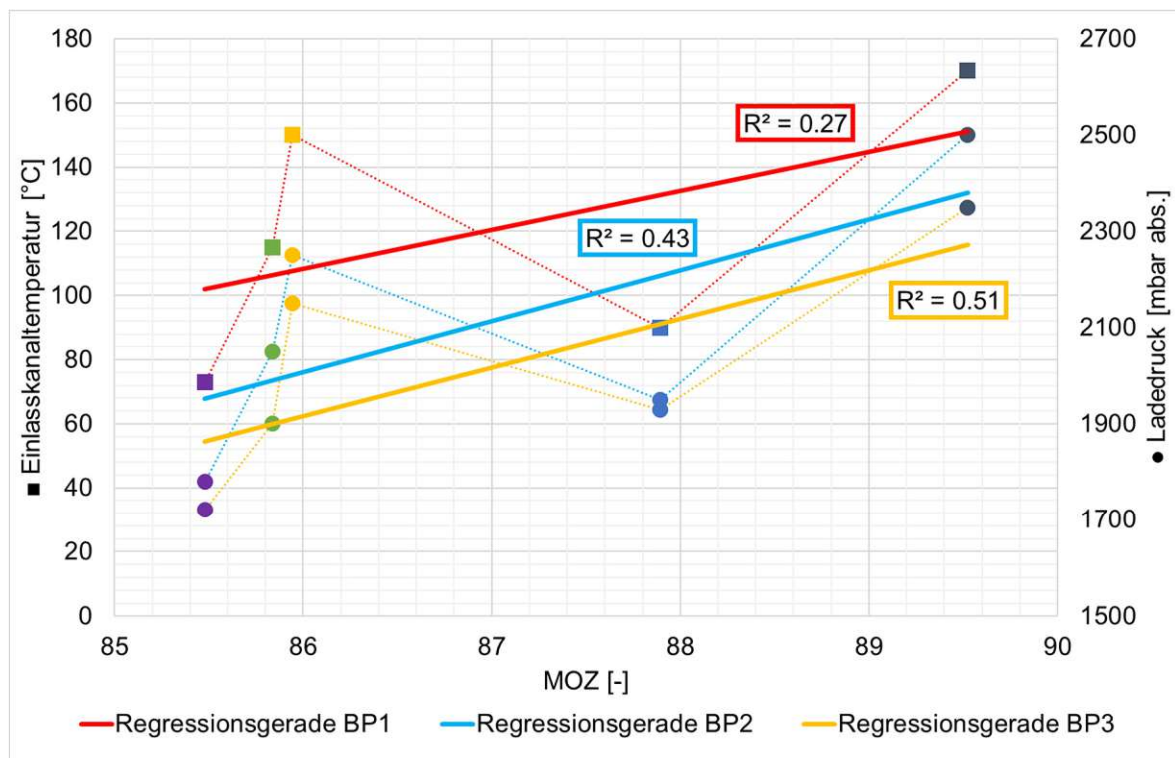


Abbildung 33: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der Motor-Oktanzahl

Entgegen der Ergebnisse aus [4] zeigen die Resultate der Korrelationsanalyse in [Abbildung 32](#) zunächst einen guten Zusammenhang zwischen den gemessenen Temperaturen (BP1) beziehungsweise den Druckmaxima (BP2 und BP3) am Serienmotor und der am CFR-Motor ermittelten ROZ. Die verwendete Kraftstoffmatrix in [4] weist eine Vielzahl an Kraftstoffsorten auf, welche durch Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen an Kohlenwasserstoffgruppen und Oxygenaten entstanden sind, die zwar per Definition eine ähnliche ROZ aufweisen, aufgrund der beschriebenen Problematik in der ROZ/MOZ-Messung (siehe [Kapitel 4.1](#)) das tatsächliche Selbstzündungsverhalten der Kraftstoffe nicht entsprechend abgebildet wird und die Kraftstoffnorm DIN EN 228 nicht erfüllt wird. Da die verwendeten Proben in dieser Diplomarbeit der Kraftstoffnorm [5] entsprechen kann eine ausreichend gute Abbildung durch die ROZ-Messung gewährleistet werden.

Im Gegenzug weist die Motor-Oktanzahl eine unzufriedenstellende Bewertung der Kraftstoffcharakteristik in Bezug auf das Selbstzündungsverhalten zu. Insbesondere die im Verhältnis zu den restlichen Proben hohe MOZ der Kraftstoffprobe PR8809 zeigt keine gute Abbildung der Vorentflammungswahrscheinlichkeit. Grund ist der niedrige Gehalt an Aromatenverbindungen, was sich in der MOZ-Messung nicht bemerkbar macht, sich jedoch an modernen Motoren als nachteilig erweist. Zusätzlich ist ein höherer Gehalt an Paraffinen zu verzeichnen und somit, aufgrund der ausgeprägten NTK-Charakteristik, ebenfalls Auswirkungen entsprechend den thermodynamischen Randbedingungen im Brennraum auf die Ergebnisse zeigt. Ferner zeigen die Korrelationsdaten zwischen der (berechneten) Sensitivität und der Messwerte am Serienmotor ebenso niedrige Werte, was wiederum für eine unzureichende Bewertung der Kraftstoffproben anhand der Sensitivität spricht. Diese Daten sind hier aufgrund der Relevanz nicht explizit dargestellt.

In weiterer Folge wird die Korrelationsanalyse anhand der CPI-Kennzahl diskutiert. Da die neu entwickelte Methode am modifizierten CFR-Motor an zwei Standorten durchgeführt wurde und es hierbei zu unterschiedlichen Ergebnissen (siehe [Kapitel 5.1](#)) gekommen ist, sind zwei Datensätze erforderlich. Die Korrelationsdaten anhand der CPI-Kennwerte vom IFA der TU Wien sind in [Abbildung 34](#), jene Daten der Fa MIBÖ aus Lohmar in [Abbildung 35](#) dargestellt.

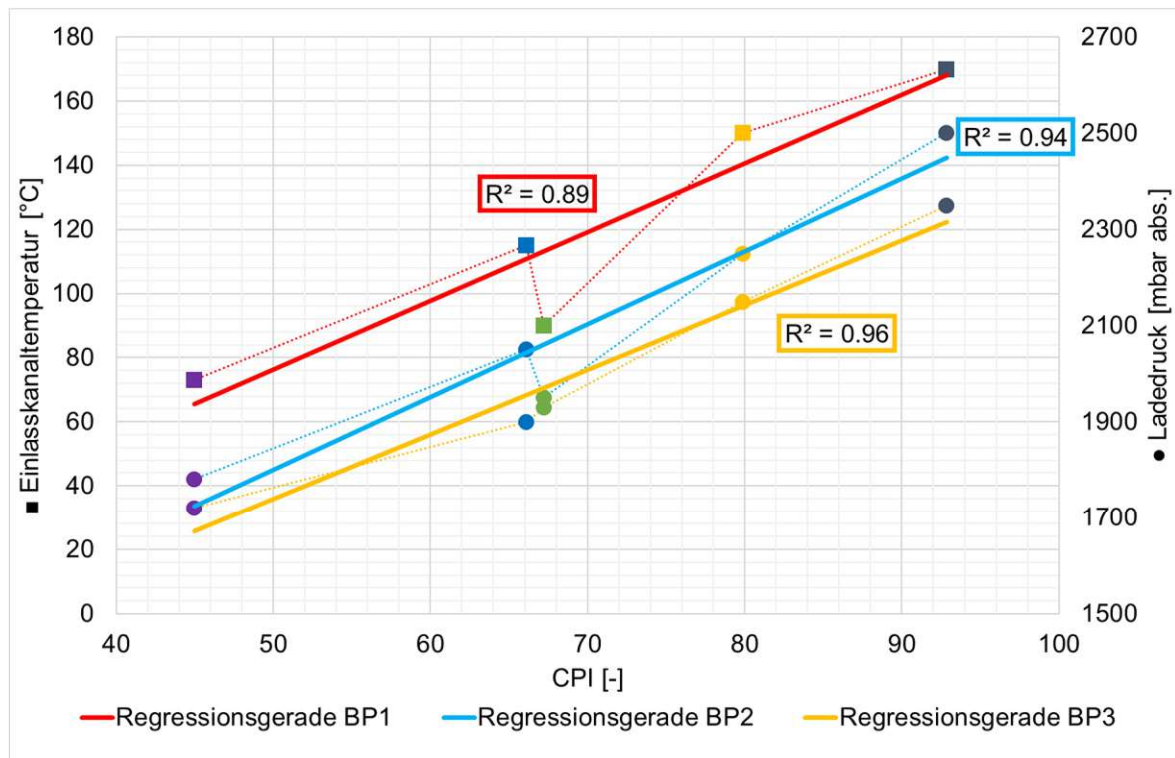


Abbildung 34: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der CPI-Kennzahl (IFA)

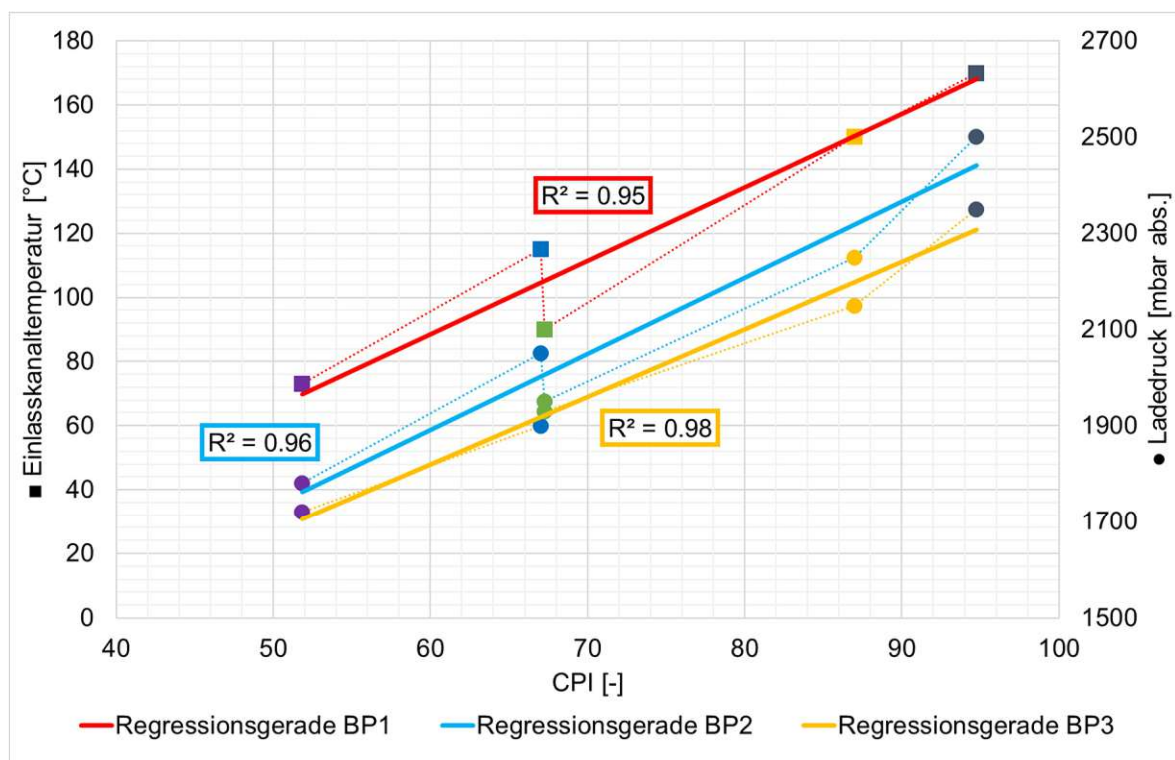


Abbildung 35: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der CPI-Kennzahl (MIBÖ)

Sowohl die Korrelationsanalyse anhand der Daten des IFA der TU Wien in Abbildung 34, als auch jene mittels der Daten der Fa MIBÖ (Abbildung 35) zeigen eine sehr gute Korrelation. Lediglich der Probenkraftstoff PR8809 zeigt am Serienmotor ein etwas anderes Verhalten, als die ermittelten Kennzahlen am CFR-Motor vermuten lassen. Die Kraftstoffzusammensetzung (siehe Tabelle 2) weist diesem Kraftstoff einen höheren Gehalt an Paraffinen und einen vergleichsweise niedrigen Gehalt an Aromaten aus. Da aus [50] bekannt ist, dass stark paraffinhaltige Kraftstoffe eine ausgeprägte NTK-Charakteristik vorweisen, spielen die thermodynamischen Randbedingungen am Versuchsträger insbesondere bei dieser Probe eine erhebliche Rolle. Aus diesem Grund werden die In-Zylinder-Bedingungen des CFR-Prüfmotors mit jenen des Serienmotors in Kapitel 6 verglichen, um Rückschlüsse auf die unterschiedliche Selbstzündungscharakteristik zwischen den verschiedenen Verfahren ziehen zu können.

Zum Abschluss der Korrelationsanalysen werden in Abbildung 36 die am AFIDA ermittelten CVPI-Werte herangezogen.

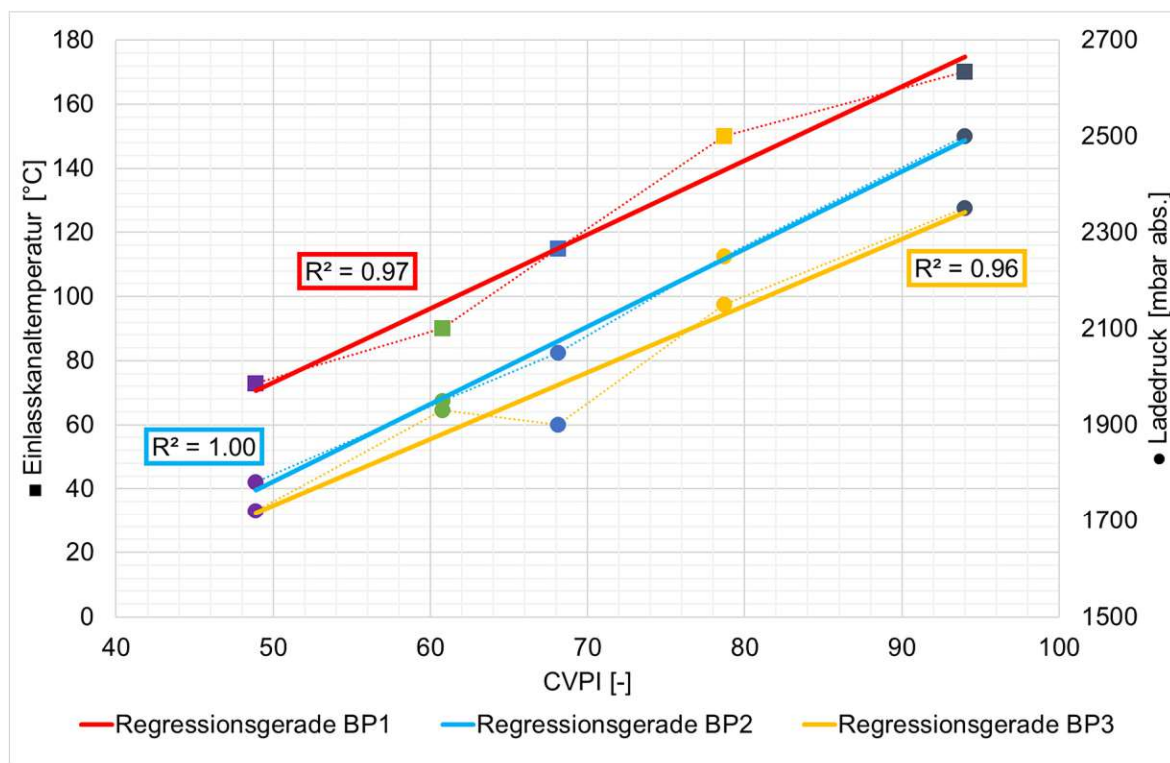


Abbildung 36: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der CVPI-Kennzahl

Die CVPI-Messwerte in der Konstantvolumenbrennkammer, attestieren eine gute Übereinstimmung mit den Zahlen am Serienmotor und somit lassen auch diese eine gute Vorhersagbarkeit über die gasphaseninduzierte Vorentflammungswahrscheinlichkeit zu. Diese nahezu perfekten Korrelationswerte sind allerdings etwas zu relativieren, da die Randbedingungen dieser Prüfmethode noch nicht eindeutig festgelegt sind und hier ein gewisser Spielraum besteht. Zur Findung der Betriebsparameter werden derzeit die Parameter und die Messwerte am CFR-Motor als Anhaltspunkt

verwendet und die Betriebsbedingungen während der CVPI-Messung danach ausgerichtet. Ein Zusammenhang der chemischen Stoffzusammensetzung respektive physikalischer Eigenschaften mit den Ergebnissen am Dreizylinder-Vollmotor konnte nicht erkannt werden. Eine Untersuchung diesbezüglich scheint aufgrund der kompakten Kraftstoffmatrix (fünf Proben) jedoch ohnehin nicht zielführend.

### Zusammenfassung des Vorentflammungsverhaltens am Serienmotor

Die Grenzwertbedingungen aller drei Betriebspunkte am Serienmotor sind folglich zusammengefasst in Tabelle 12 dargestellt. Während im ersten Betriebspunkt die Einlasskanaltemperatur bei einem konstanten Ladedruck von 2000mbar (absolut) variiert wird, werden in den beiden anderen Betriebspunkten der Ladedruck bei konstanter Einlasskanaltemperatur (BP2: 100°C, BP3: 95°C) verändert.

Tabelle 12: Grenzbedingungen der Vorentflammungsuntersuchungen am Serienmotor (kritische Ladelufttemperatur, kritischer Ladedruck)

Kraftstoffprobe	BP1	BP2	BP3
PR8608	73°C	1780 mbar	1720 mbar
PR8572	115°C	2050 mbar	1900 mbar
PR8809	90°C	1950 mbar	1930 mbar
PR8616	150°C	2250 mbar	2150 mbar
PR8785	170°C	2500 mbar	2350 mbar

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Daten der Korrelationsanalyse zwischen dem Serienmotor und den Kennzahlen aus den Versuchen am CFR-Prüfmotor sowie am AFIDA. Es zeigt sich, dass sowohl die C(V)PI als auch die ROZ-Messwerte mit den Messwerten in allen Betriebspunkten des Serienmotors eine gute Korrelation aufweisen. Die Motor-Oktanzahl lässt aufgrund der geringen Korrelation keine Beschreibung des Vorentflammungsverhaltens am Serienmotor zu.

Tabelle 13: Korrelationsanalyse der Ergebnisse am Serienmotor und der Kraftstoffkennzahlen der unterschiedlichen Prüfverfahren am CFR-Prüfmotor sowie am AFIDA

Betriebspunkt	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>				
	CPI IFA	CPI MIBÖ	CVPI	ROZ	MOZ
1	89%	95%	97%	87%	27%
2	94%	96%	100%	96%	43%
3	96%	98%	96%	97%	51%



Abseits der Ergebnisse sollte zusätzlich eine weitere Erkenntnis nicht unerwähnt bleiben. Während der Vorentflammungsuntersuchungen am Motorprüfstand konnte plötzlich ein Kompressionsabfall an einem der drei Zylinder beobachtet werden. Folglich entschied man sich für eine Inspektion des Zylinders und hat dadurch einen Kolbenschaden festgestellt. Das hohe Schadenspotential ausgelöst durch Verbrennungsanomalien (klopfende Verbrennung, Vorentflammung) wurde bereits grundlegend diskutiert. Der in Abbildung 37 abgebildete Schaden am Kolben soll diese Thematik nochmals verdeutlichen.



Abbildung 37: Kolbenschaden am Serienmotor

## 6 Validierung der Messmethodik

### 6.1 Untersuchung des CPI-Messverfahrens

Bei den zuvor dargestellten Messdaten des CFR-Prüfmotors kann eine teils große Abweichung zwischen den CPI-Kennzahlen, welche einerseits am IFA und andererseits bei der Fa MIBÖ ermittelt wurden, beobachtet werden. Dementsprechend ist es von Interesse verschiedene Einflüsse auf das Prüfverfahren zu untersuchen, um mögliche Ursachen für die große Diskrepanz zu finden. Zu diesem Zweck sind zahlreiche Parameter in der Prüfmethodik verändert worden, wobei nachfolgend einige Ansätze detailliert vorgestellt werden.

#### Luftfeuchtigkeit in der Prüfkammer

Die erste detaillierte Analyse stellt eine Luftfeuchtigkeitsvariation in der Prüfkammer dar. Hierzu sind Messungen mit einem Probenkraftstoff (PR8616) bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit in der Ansaugluft durchgeführt worden. Die Messdaten des Proben- und Referenzkraftstoffes sind in Tabelle 14 angeführt. Die Messungen sind jeweils bei maximal und minimal möglicher Luftfeuchtigkeit bei identer Temperatur durchgeführt worden.

Tabelle 14: Auswirkungen der Ergebnisse am CFR-Motor hinsichtlich einer Variation der Luftfeuchtigkeit im Ansaugtrakt

Kraftstoff	DCR	$\epsilon$	CPI	Luftfeuchte (rel.)
Isoktan	1394	14.93	100	26%
PR8616	1362	13.99	81.3	
Isoktan	1402	15.16	100	73%
PR8616	1370	14.21	80.9	

Laut den Untersuchungen (Tabelle 14) erhöht sich die maximal einstellbare DCR (und somit auch das Verdichtungsverhältnis  $\epsilon$ ) mit steigender Luftfeuchtigkeit. Dies scheint plausibel. Es gilt außerdem zu beachten, dass die Veränderung der Luftfeuchte sowohl den Probenkraftstoff als auch den Referenzkraftstoff beeinflusst. Exakt diese Auswirkung wird durch die Referenzmessung (Isoktan) ausgeglichen. Somit kann eine (messbare) Abweichung der resultierenden CPI-Kennzahlen nicht durch eine Veränderung der Luftfeuchtigkeit in der Testkammer erklärt werden.

### Abweichung des DCR-Wertes am Prüfmotor bzw. FCS-System

Die Regelung der Verdichtung durch Verstellung der Zylinderhöhe am CFR-Prüfmotor erfolgt automatisiert über das Fuel Classification System (FCS) mittels des DCR-Wertes. Zur Grundeinstellung des Zylinders erfolgt eine Kalibrierung der DCR-Anzeige anhand einer Kompressionsdruckmessung im Zylinder. Um die Einflüsse einer falschen Kalibrierung darlegen zu können wird anhand dieser Analyse die Zylinderhöhe am CFR-Prüfmotor bewusst verstellt, sodass diese nicht weiter mit dem am FCS angezeigten DCR-Wert übereinstimmt. Das Verdichtungsverhältnis wird gemäß Gleichung (5) aus Kapitel 4.1 anhand des DCR-Wertes berechnet. Der Zusammenhang dieser beiden Kennzahlen ist zur besseren Veranschaulichung in [Abbildung 38](#) dargestellt.

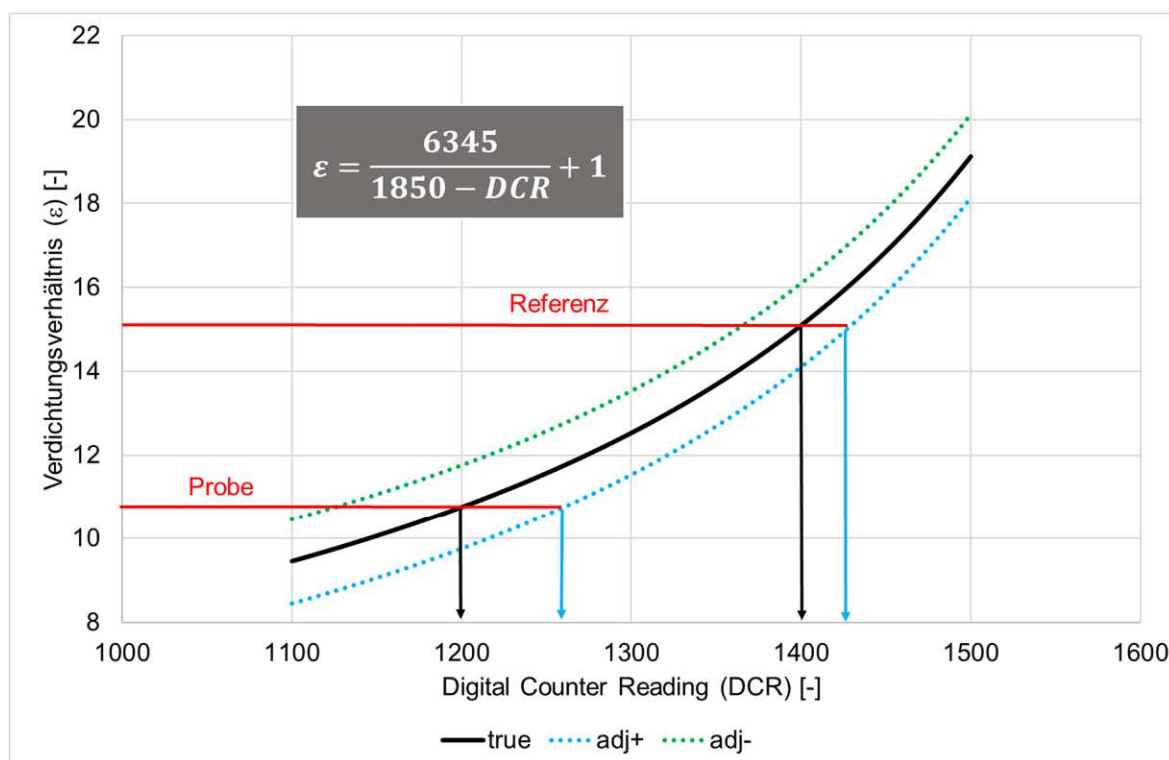


Abbildung 38: Zusammenhang des Verdichtungsverhältnis und der DCR-Anzeige am CFR-Motor

Abbildung 38 beweist, dass kein linearer Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsverhältnis und dem DCR-Zahlenwert besteht. Vielmehr ähnelt die Form einer exponentiellen Kurve. In Abbildung 38 sind neben der „wahren“ Kurve zwei Kurven dargestellt, die eine bewusste Falscheinstellung der Zylinderhöhe darstellen sollen. Dem exponentiellen Verlauf geschuldet ist die Tatsache, dass mit höher werdendem DCR-Messwert die Abweichung bei einer Falscheinstellung geringer ausfällt. Verdeutlicht werden soll dies zusätzlich durch die eingezeichneten Beispiellinien eines Referenz- und Probenkraftstoffes. Reale Versuche am IFA haben diese Theorie bestätigt und Abweichungen der CPI-Kennzahl bei falscher Kalibrierung der Zylinderhöhe nachgewiesen. Hierzu wurde die Zylinderhöhe anhand der DCR-Kennzahl zunächst um 100

DCR-Einheiten nach oben und im Anschluss 100 DCR-Einheiten nach unten justiert. Die erhaltenen Messresultate sind in Tabelle 15 angeführt.

Tabelle 15: Messresultate am CFR-Prüfmotor mit falsch eingestellter Zylinderhöhe

Parameter	PR8616	Isooktan
DCR	1363	1398
DCR adj+	1470	1503
DCR adj-	1273	1302
$\varepsilon$	14.03	15.04
$\varepsilon$ adj+	17.70	19.29
$\varepsilon$ adj-	12.00	12.58
CPI	80	100
CPI adj+	68	100
CPI adj-	88	100

Bei richtiger Einstellung der DCR-Kennung führt dies für die Probe PR8616 zu einem CPI-Wert von rund 80 Einheiten. Bei einer Adjustierung der DCR-Einstellung wurde für den verwendeten Probenkraftstoff eine CPI von 68 beziehungsweise 88 gemessen. Die CPI-Kennzahl des Referenzkraftstoffes (Isooktan) bleibt aufgrund der Wertzuweisung unverändert.

### Aufbau der Abgasanlage

In den bestehenden Normen zur Kraftstoffcharakterisierung am CFR-Motor wird festgehalten, dass der statische Auspuffgedruck so niedrig wie möglich sein muss. Dies wird am IFA durch eine Absaugung im Bereich des Auspuffendrohres realisiert. Da sich die Abgasanlage zwischen dem Prüfaufbau am IFA und der Fa MIBÖ unterscheidet sollte auch auf diese Thematik eingegangen werden, um etwaige Auswirkungen bei unterschiedlicher Gestaltung der Abgasanlage zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurde der Auspuff dahingehend modifiziert, den Auspuffgedruck beeinflussen zu können. Um den Gegendruck zu minimieren, wurde die Absaugung auf höchster Stufe betrieben, der Trichter der Absaugeinheit unmittelbar am Endrohr positioniert und der Leerraum mit Luftpolsterfolie verschlossen. Diese Konstellation ist in Abbildung 39 zu sehen.



Abbildung 39: Absaugung des Abgasstromes des CFR-Prüfmotors am IFA der TU Wien (minimaler Gegendruck)

Demgegenüber wurde ein hoher Gegendruck durch eine Verengung mittels einer Lochblende im Auspufftrakt simuliert. Die verwendete Lochblende im ein- und ausgebauten Zustand ist in [Abbildung 40](#) ersichtlich.

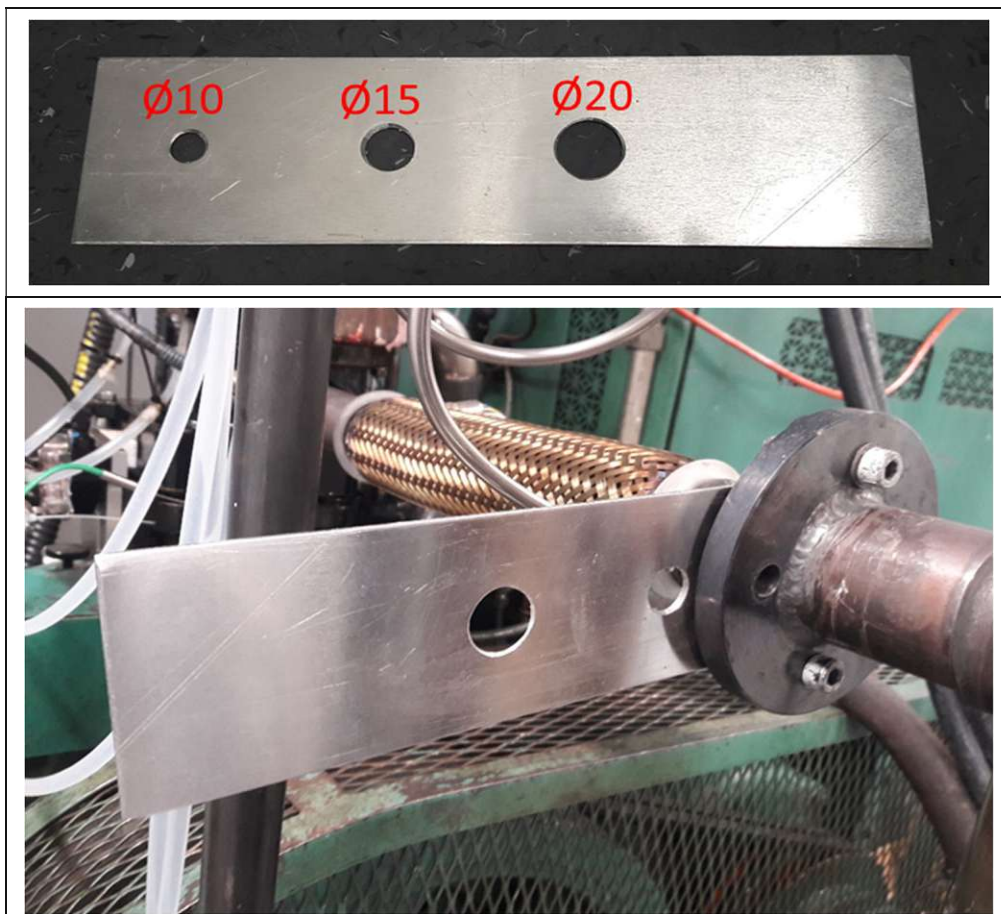


Abbildung 40: Lochblende zur Erhöhung des Abgasgedrucks am CFR-Prüfmotor

Ferner wurden Referenzmessungen mit dem Standardaufbau durchgeführt. Beim Standardaufbau wird die Absaugung im Bereich der Abgasanlage ohne Verwendung einer Luftpolsterfolie auf mittlerer Stufe betrieben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Auswirkungen der Ergebnisse am CFR-Motor hinsichtlich einer Variation des Auspuffgedrucks

Kraftstoff	DCR	$\varepsilon$	CPI	Gegendruck
Isooktan	1400	15.08	100	minimal
PR8608	1285	12.22	42.8	
Isooktan	1398	15.02	100	maximal
PR8608	1278	12.10	41.5	
Isooktan	1399	15.06	100	Standard
PR8608	1280	12.14	41.5	

Anhand der dargestellten Messwerte in Tabelle 16 ist ersichtlich, dass das Prüfverfahren durch Veränderung der Abgasanlage nicht beeinflusst wird. Wenn auch geringfügige Unterschiede in den DCR- respektive CPI-Kennzahlen ersichtlich sind, lässt sich diese Diskrepanz durch die Messtoleranz relativieren.

### Zusammenfassung der Einflussnahme aufgrund veränderter Prüfparameter

Eine Zusammenfassung der soeben vorgestellten Veränderungen am Prüfverfahren sowie anderen veränderten Prüfparameter und deren Einfluss auf die Messresultate sind in Tabelle 17 dargestellt. Diese Erkenntnisse bieten zusätzliches Potential für weiterführende Untersuchungen.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Einflussnahme aufgrund veränderter Prüfparameter am CFR-Forschungsmotor

Prüfparameter	Einfluss
Luftfeuchtigkeit in der Prüfkammer	nein
Abweichung des DCR-Wertes am Prüfmotor bzw. FCS-System	ja
Aufbau der Abgasanlage	nein
Position des Winkelmarkengebers	nein
Zündkerze	nein
Probenentnahme aus unterschiedlichen Behältern	nein

### Statistische Auswertung einer Messreihe (Präzision)

Derzeit liegt die Wertung der Messergebnisse und die Anzahl an Messwiederholungen noch in der Verantwortung des Prüfers, da es beim CPI-Verfahren noch keine belastbaren Angaben zu einer Wiederholbarkeit respektive Vergleichbarkeit wie beispielsweise beim ROZ/MOZ-Messverfahren gibt. Während die Wiederholbarkeit die Differenz zwischen Ergebnissen unter gleichen Prüfbedingungen (gleicher Prüfer mit identem Gerät) abbildet, trifft die Vergleichbarkeit eine Aussage über die Differenz zwischen Ergebnissen unter verschiedenen Prüfbedingungen (andere Prüfer an unterschiedlichen Geräten). Um ähnliche Grenzen auch beim CPI-Verfahren längerfristig in den Prüfplan aufnehmen zu können, hat man sich dazu entschieden eine Messreihe bestehend aus mindestens 25 Einzelmessungen eines Referenz- und Probenkraftstoffes durchzuführen. Die Ergebnisse sind in [Abbildung 41](#) dargestellt.

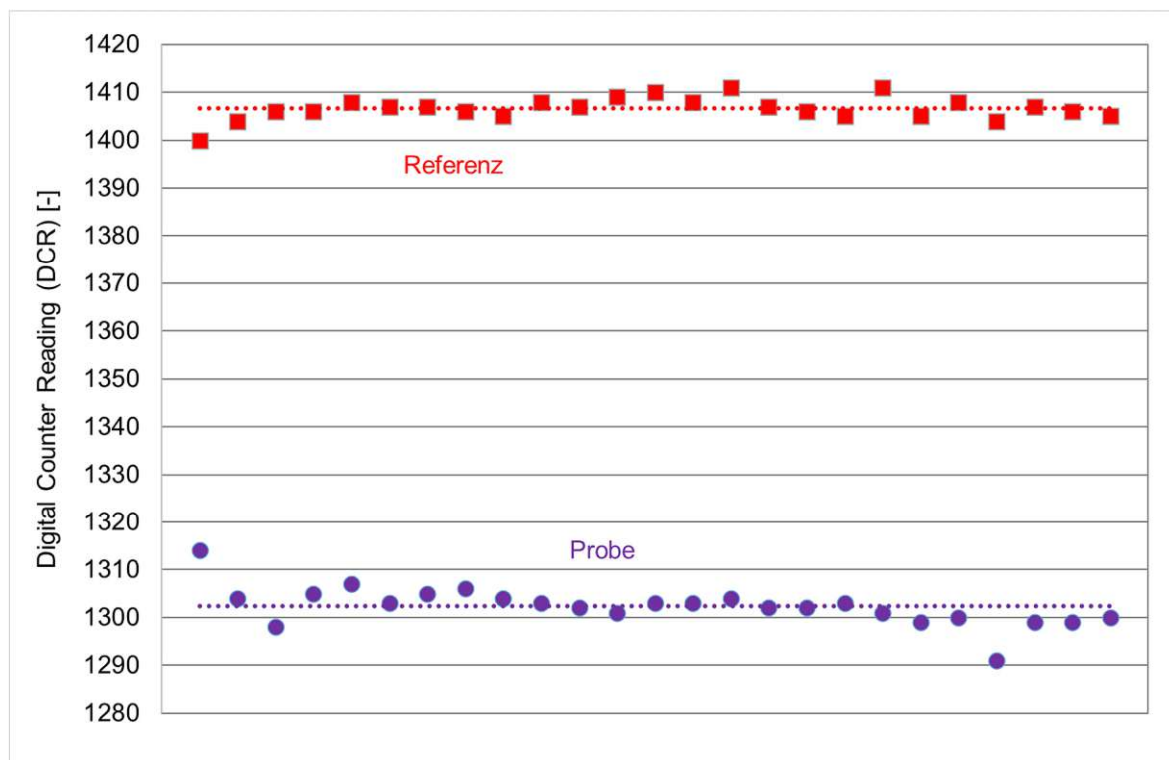


Abbildung 41: DCR-Werte eines Referenz- und Probenkraftstoffes einer statistischen Messreihe am CFR-Prüfmotor nach der CPI-Messmethode

Ein Vorentflammungsereignis wird beim CPI-Verfahren durch schrittweise Erhöhung der Verdichtung eingeleitet. Da die Schrittweite bei der Verdichtungserhöhung fünf DCR-Einheiten beträgt, ist eine Schwankungsbreite von  $\pm 5$  DCR um den Mittelwert jedenfalls nicht auszuschließen. Die Ergebnisse in Form der DCR-Werte während der Messungen am Referenzkraftstoff (Isooktan) weichen nur geringfügig vom berechneten Mittelwert ab. Wirft man einen Blick auf die Messergebnisse des Probenkraftstoffes (PR8608) lassen sich zwei Punkte beobachten, die etwas weiter entfernt vom Mittelwert liegen und somit vorerst als Ausreißer deklariert werden können. Insbesondere

die Messung zu Beginn der Messreihe (erster Messpunkt) weist eine starke Abweichung auf. Hier liegt die Vermutung nahe, dass Restbestandteile des vorher untersuchten Kraftstoffes in den Kraftstoffleitungen zurückgeblieben sind. Bisher wird zwischen zwei unterschiedlichen Kraftstoffproben eine Spülung des Systems und anschließend ein Motorlauf ohne Messung im Ausmaß von 30 Minuten durchgeführt, um Kraftstoffvermischungen zu minimieren. Auf Basis dieser Erkenntnisse sollte eine Erhöhung der Spüldauer in Betracht gezogen werden.

Abschließend gibt Tabelle 18 einen Überblick statistischer Parameter der untersuchten Proben innerhalb der Messreihe.

Tabelle 18: statistische Kennzahlen bei Durchführung einer Messreihe

<b>Parameter</b>		<b>Probenkraftstoff (PR8608)</b>	<b>Referenzkraftstoff (Isooktan)</b>
Mittelwert (arithmetisch)	[DCR]	1302.32	1406.64
Median	[DCR]	1303	1407
Standardabweichung	[DCR]	3.96	2.31
Maximalwert	[DCR]	1314	1411
Minimalwert	[DCR]	1291	1400
Spannweite	[DCR]	23	11



## 6.2 Thermodynamische Randbedingungen im Zylinder

Grund dieser Untersuchung ist das unterschiedliche Verhalten der stark paraffinhaltigen Kraftstoffprobe PR8809 am Serienmotor und am CFR-Prüfmotor. Hohe Paraffinanteile im Kraftstoff resultieren laut [9] in einer ausgeprägten NTK-Charakteristik, die mit steigendem Druck abnimmt. Dieser Tatsache geschuldet können unterschiedliche In-Zylinder-Bedingungen zu unterschiedlichen Selbstzündungscharakteristiken führen. Durch die Umbaumaßnahmen am CFR-Motor und der Einführung der neuen Prüfmethode (CPI) versuchte man die Bedingungen im Brennraum eines modernen Downsizing-Motors bestmöglich nachzubilden. Aufgrund dessen ist es von Interesse die Brennraumbedingungen der unterschiedlichen verwendeten Versuchsträger zu vergleichen, um Unterschiede identifizieren zu können. Hierzu sind in [Abbildung 42](#) die Betriebsbedingungen des Serienmotors im Vergleich zu jenen des CFR-Motors (ROZ, MOZ, CPI) dargestellt. Die Daten des Serienmotors und die CPI-Daten stammen aus Versuchen mit dem Probenkraftstoff PR8572, wobei die Kurve des Serienmotors vielmehr als Streuband angesehen werden kann, da sich die Bedingungen je nach Betriebspunkt unterscheiden. Zusätzlich wurden diese durch ROZ- und MOZ-Daten aus [33] erweitert.

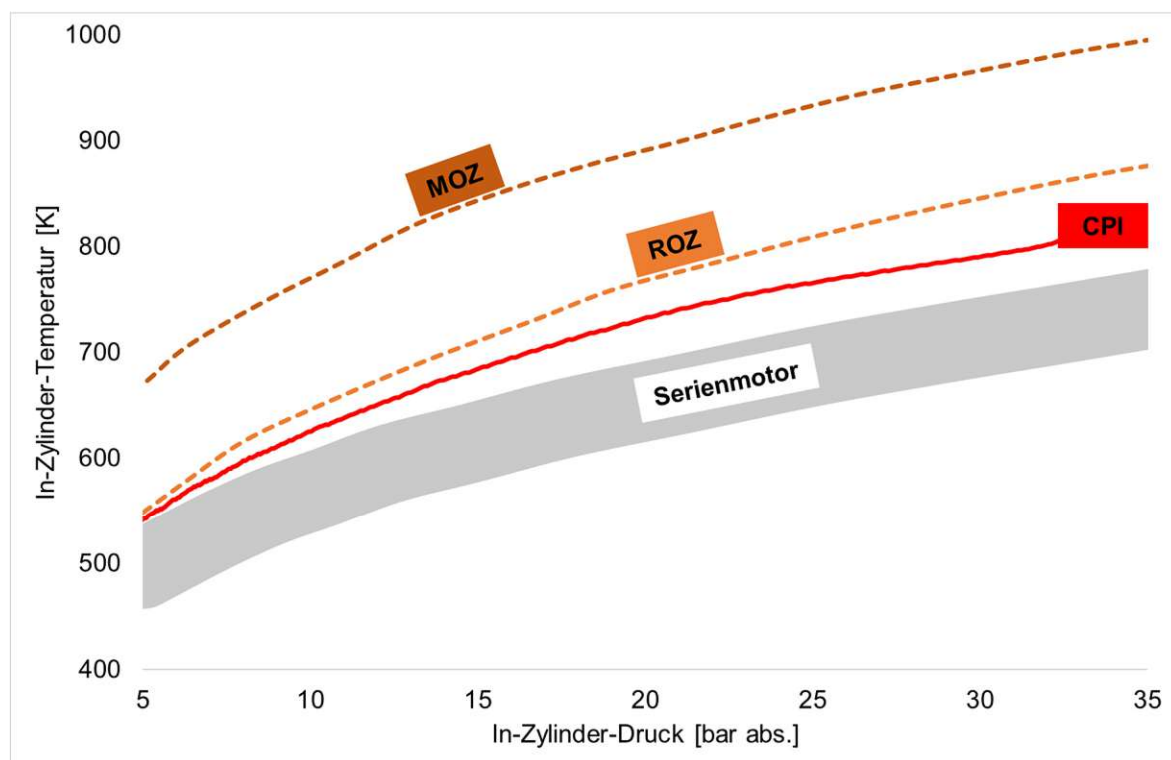


Abbildung 42: In-Zylinder-Bedingungen der verwendeten Versuchsträger bzw. Methoden

Anhand Abbildung 42 ist ersichtlich, dass die thermodynamischen Randbedingungen im Zylinder der verwendeten Prüfverfahren tatsächlich deutliche Unterschiede aufweisen. Während sich die Bedingungen bei Messungen zur Oktanzahlbestimmung

gänzlich von denen eines modernen Downsizing-Motors unterscheiden, nähert man sich mittels der CPI-Methode etwas an die Brennraumbedingungen am Serienmotor an. Dies wird vor allem durch eine moderate Aufladung von 1100mbar absolut und einer herabgesenkten Ansauglufttemperatur von 30°C erreicht. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz einer externen Aufladeeinheit inklusive Ladeluftkühlung am CFR-Prüfmotor. Dennoch ist beim Serienmotor durch die tieferen Temperaturen abhängig von der Motorlast vor allem der Nieder- und Intermediärtemperaturbereich (siehe Abbildung 1) als Zündmechanismus relevant. Dementsprechend können Kraftstoffe mit einer stark ausgeprägten NTK-Charakteristik zu unterschiedlichen Vorentflammungsergebnissen führen.

Nachfolgend sind die In-Zylinder-Bedingungen in Abhängigkeit der Kurbelwinkellage dargestellt. Anhand der gemessenen Druckverläufe ([Abbildung 43](#)) war es möglich durch eine thermodynamische Beziehung während der Kompressionsphase die sich ergebenden Temperaturen im Brennraum ([Abbildung 44](#)) zu erhalten. Der betrachtete Kurbelwinkelbereich beschränkt sich auf den Bereich kurz vor und nach dem oberen Totpunkt (OT). Wichtig zu erwähnen ist, dass der ausgewählte Verbrennungszyklus (sowohl am Serienmotor als auch am CFR-Prüfmotor) sehr nahe an der Vorentflammungsgrenze, diese aber noch nicht erreicht hat.

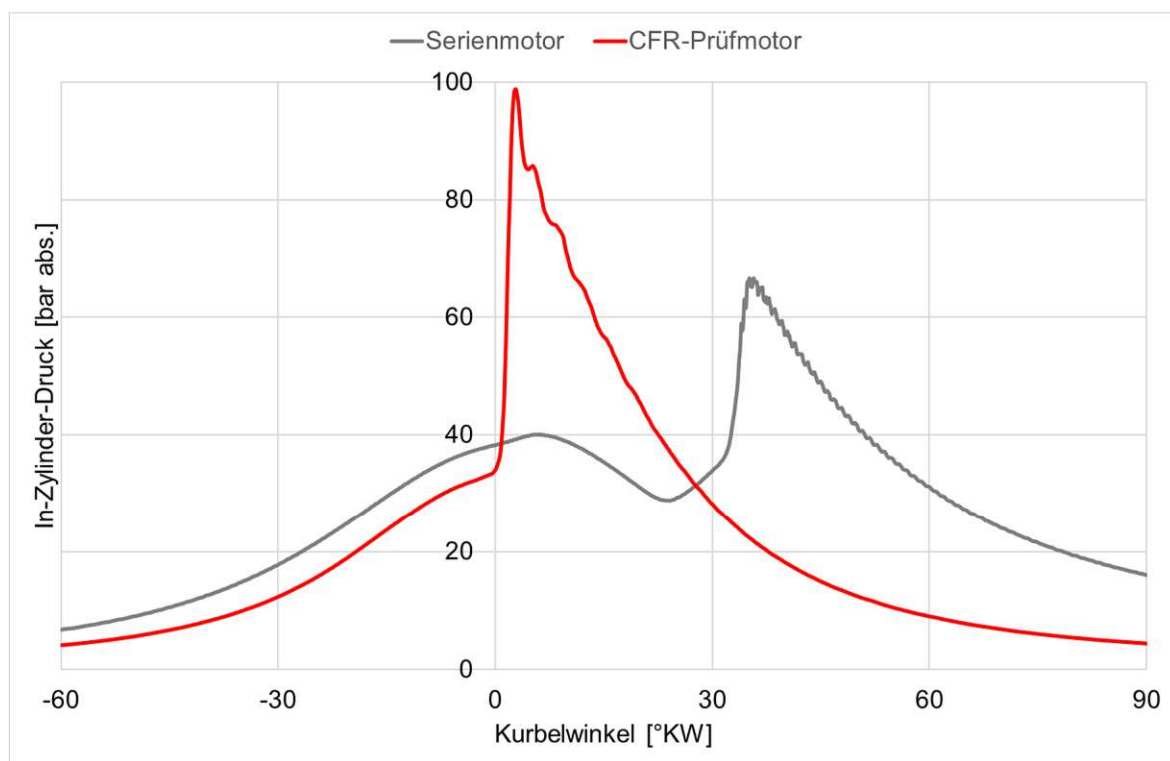


Abbildung 43: In-Zylinder-Druckverlauf mit Probenkraftstoff PR8572 und den in Kapitel 4 definierten Motorbetriebsbedingungen am Serienmotor (Betriebspunkt 3) und am CFR-Prüfmotor (CPI)

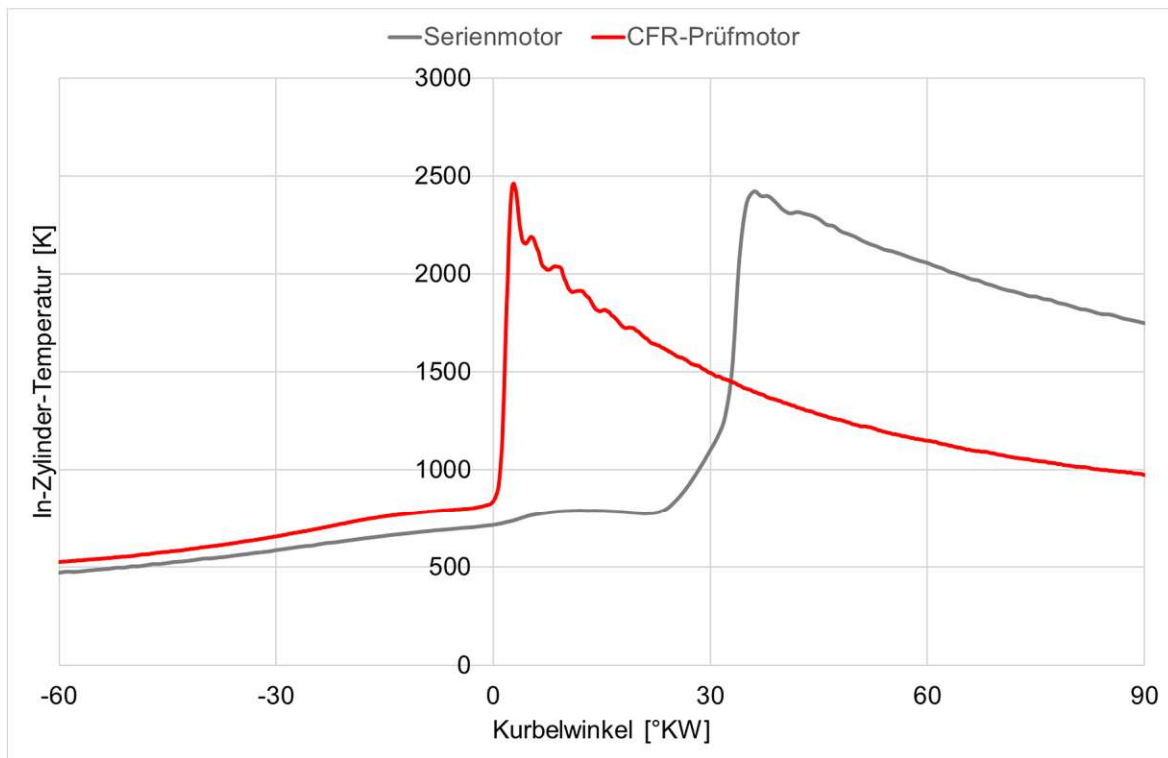


Abbildung 44: In-Zylinder-Temperaturverlauf mit Probenkraftstoff PR8572 und den in Kapitel 4 definierten Motorbetriebsbedingungen am Serienmotor (Betriebspunkt 3) und am CFR-Prüfmotor (CPI)

Die genaue Analyse der In-Zylinder-Bedingungen bestätigt die Annahme, dass die thermodynamischen Randbedingungen des CPI-Verfahrens vom Prüfverfahren am Serienmotor abweichen. Während der kritische Zustand, welcher schlussendlich zu Vorentflammungen führt, beim Serienmotor durch ein höheres Druckniveau herbeigeführt wird, wird bei der CPI-Prüfmethode eine höhere Temperatur in der Kompressionsphase erreicht. Während sich das Temperaturniveau bei der CPI-Methode im OT bei rund 860K befindet, liegt die Temperatur unmittelbar vor der Zündung (ca. 10°KW nach OT) beim Serienmotor mit knapp 800K darunter. Das Druckniveau beim CFR-Prüfmotor liegt im besagten Kurbelwinkelbereich in etwa bei 32 bis 35 bar, jenes des Serienmotors mit knapp 40 bar deutlich darüber. Dieser Tatsache geschuldet hat sich dadurch die unterschiedliche Reihung der verwendeten Kraftstoffproben am Serienmotor gegenüber den Prüfmethoden am CFR-Prüfmotor ergeben. Anhand Abbildung 43 und Abbildung 44 wird zudem bestätigt, dass sich die Schwerpunktslage der Verbrennung (MFB50%-Punkt) beim CPI-Verfahren „vor“ jener beim Serienmotor befindet.

Versuche mit Isooktan (2,2,4-Trimethylpentan) am Serienmotor haben zudem die Theorie der NTK-Charakteristik von stark paraffinhaltigen Kraftstoffen (siehe Abbildung 1) bestätigt. Das Vorentflammungsverhalten am Serienmotor war deutlich schlechter, als die Kraftstoffcharakterisierung am CFR-Prüfmotor vermuten lassen würde. Hierzu sind in [Abbildung 45](#) exemplarisch die Grenztemperaturen am Serienmotor (BP1), erweitert um die Messergebnisse mit Isooktan, dargestellt.

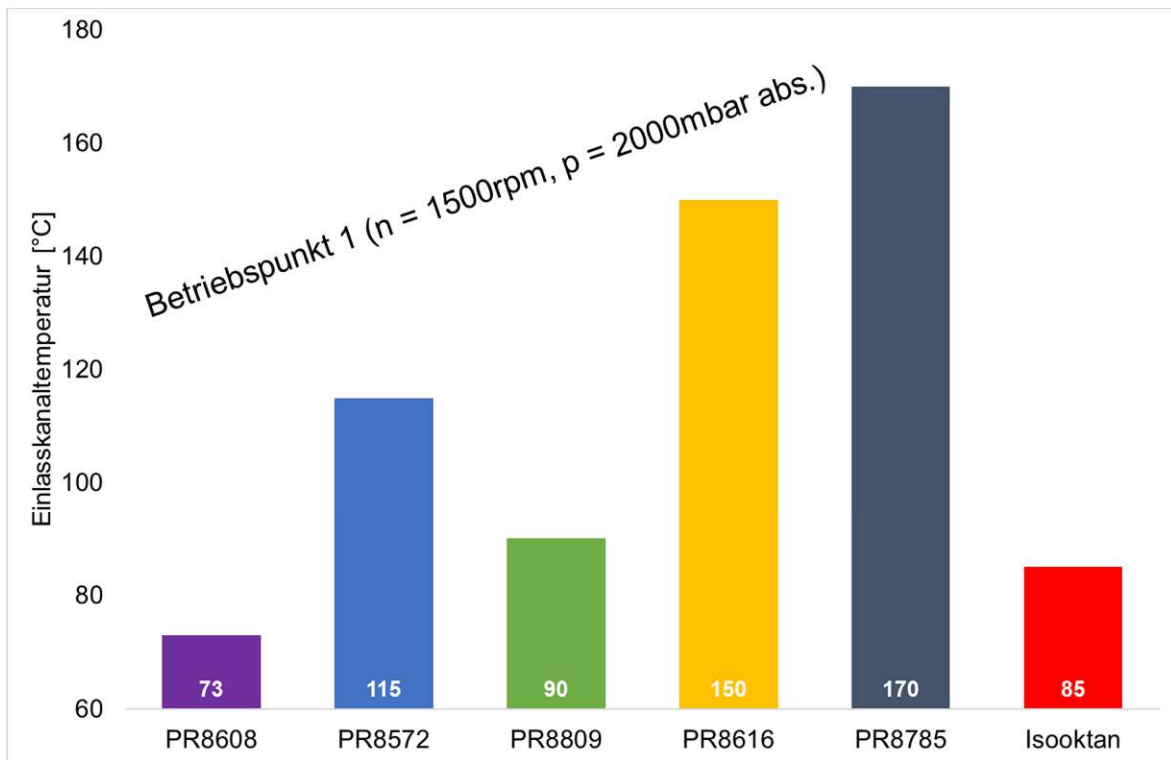


Abbildung 45: Vorentflammungsgrenzwerte Serienmotor Betriebspunkt 1 inklusive Isooktan (2,2,4-Tri-methylpentan)

## 7 Zusammenfassung

Die stetig steigenden Anforderungen, welche an moderne Verbrennungsmotoren im Hinblick auf Ökologie und Ökonomie gestellt werden, führen zu einer steigenden Popularität von Downsizing-Motoren. Neben zahlreichen positiven Aspekten durch den Einsatz von modernen Motoren nach dem Prinzip des Downsizings resultieren daraus jedoch neue Problembereiche durch das Auftreten von Verbrennungsanomalien. Diese Problematik hervorgerufen durch die geforderte hohe Leistungsdichte in Kombination mit neuen modernen Kraftstoffanteilen ziehen entwicklungstechnische Herausforderungen nach sich. Da die bisher geltenden Kennzahlen zur Kraftstoffcharakterisierung Research-Oktananzahl (ROZ) und Motor-Oktananzahl (MOZ) die Beurteilung des Vorentflammungsverhaltens nur eingeschränkt abbilden können und auch das Klopfverhalten insbesondere bei modernen Motoren nicht ausreichend bewertet werden kann sind bereits seit einigen Jahren Forschungsaktivitäten zum Zweck der Entwicklung neuartiger Prüfmethoden zur Kraftstoffcharakterisierung zugange. Diese Quantifizierung von Ottokraftstoffen kann, wie bereits die ROZ- und MOZ Prüfverfahren, weiterhin auf einem CFR-Forschungsmotor (Cooperative Fuel Research) erfolgen.

Erklärtes Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war es, die von Martin et al. [1] neu entworfene und Dedl [12] weiter untersuchte Prüfmethode an einem modifizierten CFR-Forschungsmotor mit marktkonformen Ottokraftstoffen zu validieren. Zur Quantifizierung der Vorentflammungsaktivitäten am CFR-Motor dient die dafür entwickelte Compression Pre-Ignition Kennzahl (CPI). Die Etablierung dieser CPI-Kennzahl in der Kraftstoffnorm sind die Schwerpunkte eines 2019 gestarteten internationalen Arbeitskreises „NAK Gas Phase Pre-Ignition Number“. Erforderliche Forschungsarbeiten zur Präzision und Vergleichbarkeit des Prüfverfahrens wurden an drei Anlagen 2021 gestartet und zum Teil im Rahmen dieser Diplomarbeit wissenschaftlich durchgeführt. Abseits dieser Untersuchungen wurden zudem Vorentflammungsuntersuchungen an einem Dreizylinder-Vollmotor durchgeführt und die Ergebnisse mit den Kennzahlen am CFR-Motor (ROZ, MOZ, CPI) gegenübergestellt. Hierfür standen insgesamt drei unterschiedliche Downsizing-Motoren bei zwei Automobilhersteller und am IFA der TU Wien zur Verfügung. Ferner wurde die Zündverzugszeit und die daraus abgeleitete Constant Volume Pre-Ignition Kennzahl (CVPI) der verfügbaren Kraftstoffproben an einer Konstantvolumenbrennkammer (Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer – AFIDA) ermittelt. Sowohl die CPI- als auch die CVPI-Kennzahl stellt ein Maß für die Bewertung von Kraftstoffen in Bezug auf das Vorentflammungsverhaltens dar.

Noch bevor die Kraftstoffe an den verschiedenen Prüfmotoren eingesetzt wurden, hat eine Prüfung der chemischen Zusammensetzung stattgefunden. Diese hat ergeben,

dass vier der fünf Proben sauerstoffhaltige Verbindungen (Oxygenate) enthalten, sowie alle Kraftstoffproben die Mindestanforderungen laut Kraftstoffnorm DIN EN 228 [5] erfüllen. Weiters weist der Paraffin- sowie Aromatenanteil innerhalb der Kraftstoffmatrix teils deutliche Unterschiede auf.

Dass die ausgewählten Probenkraftstoffe die Anforderungen der Kraftstoffnorm erfüllen wird durch das ROZ/MOZ-Messverfahren am CFR-Motor bestätigt. Die Ergebnisse liegen bei der ROZ-Messung im Bereich von rund 95 bis 100, bei der MOZ-Messung von rund 85 bis 90. Werden die Kraftstoffe nach aufsteigender ROZ gereiht, so ergibt sich auch beim CPI-Messverfahren die gleiche Reihenfolge. Die Kraftstoffprobe mit der höchsten Vorentflammungswahrscheinlichkeit weist einen CPI-Wert von ca. 45, jene mit der höchsten Vorentflammungsresistenz ca. 95 auf. Der Wertebereich bei der Oktanzahlmessung liegt somit signifikant unter jenem der CPI-Prüfmethode am modifizierten CFR-Prüfmotor.

Die CVPI-Kennzahlen, welche aus den Messungen an einer Konstantvolumenbrennkammer stammen, haben ähnliche Ergebnisse wie beim CPI-Prüfverfahren ergeben. Da jedoch noch keine einheitlichen Betriebsparameter bei diesem Verfahren vorherrschen und diese vorerst noch mithilfe der CPI-Kennzahlen angeglichen werden, können hierzu noch keine belastbaren Ergebnisse bereitgestellt werden.

Für die Untersuchungen am Serienmotor wurde das eingesetzte Downsizing-Aggregat um eine zusätzliche externe Aufladeeinheit und einem Heizelement im Saugrohr erweitert, um Selbstzündungen im Brennraum zu erzwingen. Durch Erhöhung der Ansauglufttemperatur respektive des Ladedrucks wurden bewusst kritische Betriebszustände herbeigeführt und die Grenzwerte bei denen Vorentflammungsaktivitäten aufgetreten sind, notiert. Um mögliche Unterschiede im Verhalten identifizieren zu können, wurde der Serienmotor bei drei unterschiedlichen Betriebspunkten betrieben. Das Verhalten der Kraftstoffproben zeigt teils ein anderes Verhalten, als die vorangehenden Untersuchungen am CFR-Prüfmotor vermuten lassen würden. Generell lässt sich jedoch eine gute Korrelation zwischen den neu ermittelten Kraftstoffkennzahlen (CPI und CVPI) sowie der bekannten ROZ und den Messergebnissen am Serienmotor feststellen (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Korrelationsanalyse der Ergebnisse hinsichtlich der Vorentflammungsuntersuchungen am Serienmotor und der ermittelten Kraftstoffkennzahlen am CFR-Motor sowie AFIDA

CPI	Bestimmtheitsmaß $R^2$		
	CVPI	ROZ	MOZ
95%	98%	93%	40%

Der Tatsache geschuldet, dass zumindest eine Probe ein gänzlich anderes Selbstzündungsverhalten in Abhängigkeit der verschiedenen Prüfverfahren gezeigt hat, wurde dies zum Anlass genommen die In-Zylinder-Bedingungen der verwendeten Messträger zu untersuchen. Hier hat sich gezeigt, dass die thermodynamischen Randbedingungen des CFR-Motors von denen des modernen Serienmotors abweichen. Das Temperaturniveau im Brennraum knapp vor der (Selbst-)Zündung liegt beim CFR-Motor über dem des Serienmotors. Mithilfe reaktionskinetischer Analysen aus [9], [10] konnte bestimmten Anteilen im Kraftstoff eine hohe Temperaturabhängigkeit im Selbstzündverhalten nachgewiesen werden. Diese Temperaturabhängigkeit wird auch als NTK-Verhalten (Niedertemperaturkoeffizient) bezeichnet und kann insbesondere bei Kraftstoffen mit hohen Paraffinanteilen beobachtet werden. Da exakt jene Probe mit den größten Abweichungen zwischen den verschiedenen Prüfverfahren die höchsten Paraffinanteile aufweist, gilt die NTK-Charakteristik in Verbindung mit abweichenden Brennraumbedingungen als Ursache für unterschiedliche Messresultate.

### **Limitierungen und Ausblick**

Hinsichtlich der CVPI-Kennzahl wurde bereits angemerkt, dass weitere Untersuchungen zur Findung geeigneter Betriebsparameter notwendig sind. Weiters haben die durchgeführten Tests gezeigt, dass sich stark paraffinhaltige Kraftstoffe am modifizierten CFR-Prüfverfahren und am Serienmotor aufgrund der unterschiedlichen In-Zylinder-Bedingungen unterschiedlich verhalten und sich dadurch entsprechende Einschränkungen beim CPI-Verfahren ergeben. Dies könnte ebenso einen Ausgangspunkt für zusätzliche Untersuchungen darstellen. Leider waren bei Drucklegung dieser Diplomarbeit die Forschungsergebnisse der weiteren zwei Serienmotoren und der dritten CFR-Anlage noch nicht vorhanden und konnten somit nicht berücksichtigt werden. Ferner kann davon ausgegangen werden, dass die vorgestellten Prüfmethode zur Kraftstoffcharakterisierung durch die Weiterverwendung von zukünftigen Kraftstoffen (e-Fuels) und alternativen Kraftstoffsorten in den nächsten Dekaden bedeutsam für die Automobilindustrie bleiben.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Martin, C.; Graf, J.; Luef, R.; Grabner, P.: Downsizingkraftstoff. FVV-Vorhaben Nr. 1078, Frankfurt am Main 2015.
- [2] Bundesministerium: Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Energie in Österreich 2020 - Zahlen, Daten, Fakten, 2020.
- [3] Maus, Wolfgang: Zukünftige Kraftstoffe. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-58005-9 (2019).
- [4] Budak, Oguz; Dedl, Jörg; Heufer, Karl Alexander: Kraftstoffkennzahlen Biofuels II. FVV-Vorhaben Nr. 1180, Frankfurt am Main 2018.
- [5] DIN EN 228 (2012) Kraftstoffe - Unverbleite Kraftstoffe - Anforderungen und Prüfverfahren.
- [6] van Basshuysen, Richard; Schäfer, Fred: Handbuch Verbrennungsmotor. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-04677-4 (2015).
- [7] Pischinger, Rudolf: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Wien: Springer. ISBN: 978-3211-99276-0 (2009).
- [8] Arrhenius S.A.: Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. Zeitschrift für physikalische Chemie 4, 1889, p. 226.
- [9] Curran, H. J.; Gaffuri, P.; Pitz, W. J.; Westbrook, C. K.: A Comprehensive Modeling Study of n-Heptane Oxidation. Combustion and Flame, 1998, Jahrgang 114, Heftnummer 1-2, Seite 149–177.
- [10] Atef, Nour; Kukkadapu, Goutham; Mohamed, Samah Y.; Rashidi, Mariam Al; Banyon, Colin; Mehl, Marco et al.: A comprehensive iso-octane combustion model with improved thermochemistry and chemical kinetics. Combustion and Flame, 2017, Jahrgang 178, Seite 111–134.
- [11] Golloch, Rainer: Downsizing bei Verbrennungsmotoren. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. ISBN: 3-540-23883-2 (2005).
- [12] Dedl, Jörg: Entwicklung und Validierung potenzieller Prüfmethode zur Selbstzündungscharakterisierung von Ottokraftstoffen. Dissertation am IFA der TU Wien, 2019.



- [13] Merker, Günter P.; Teichmann, Rüdiger: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-19211-2 (2018).
- [14] van Basshuysen, Richard: Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblausung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-12214-0 (2017).
- [15] Scharlipp, Sebastian: Untersuchung des Klopfverhaltens methanbasierter Kraftstoffe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-20204-0 (2017).
- [16] Willand, Jürgen; Daniel, Marc; Montefrancesco, Emanuela; Geringer, Bernhard; Hofmann, Peter; Kieberger, Markus: Grenzen des Downsizing bei Ottomotoren durch Vorentflammungen. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2009, Jahrgang 70, Heftnummer 5, Seite 422–428.
- [17] Amann, Manfred; Alger, Terrence; Mehta, Darius: The Effect of EGR on Low-Speed Pre-Ignition in Boosted SI Engines. SAE Technical Paper, 2011, Heftnummer 4, Seite 235–245.
- [18] Wang, Zhi; Liu, Hui; Song, Tao; Xu, Yaqi; Wang, Jian-Xin; Li, Dong-Sheng; Chen, Tao (2014): Investigation on Pre-ignition and Super-Knock in Highly Boosted Gasoline Direct Injection Engines (SAE Technical Paper, 2014-01-1212).
- [19] Takeuchi, Kazuo; Fujimoto, Kosuke; Hirano, Satoshi; Yamashita, Minoru: Investigation of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection - Spark Ignition Engines. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2012, Jahrgang 5, Heftnummer 3, Seite 1017–1024.
- [20] Shuen, J. S.; Yang, Vigor; Hsiao, C. C.: Combustion of liquid-fuel droplets in supercritical conditions. Combustion and Flame, 1992, Jahrgang 89, Heftnummer 3-4, Seite 299–319.
- [21] Palaveev, Stefan; Magar, Max; Kubach, Heiko; Schiessl, Robert; Spicher, Ulrich; Maas, Ulrich: Premature Flame Initiation in a Turbocharged DISI Engine - Numerical and Experimental Investigations. SAE International Journal of Engines, 2013, Jahrgang 6, Heftnummer 1, Seite 54–66.
- [22] Morikawa, Koji; Moriyoshi, Yasuo; Kuboyama, Tatsuya; Imai, Yasuo; Yamada, Toshio; Hatamura, Koichi (2015): Investigation and Improvement of LSPI Phenomena and Study of Combustion Strategy in Highly Boosted SI Combustion in Low

Speed Range (SAE Technical Paper, 2015-01-0756). Available online at <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-0756/>.

[23] Long, Yan; Wang, Zhi; Qi, Yunliang; Xiang, Shouzhi; Zeng, Guang; Zhang, Peng et al. (2016): Effect of Oil and Gasoline Properties on Pre-Ignition and Super-Knock in a Thermal Research Engine (TRE) and an Optical Rapid Compression Machine (RCM) (SAE Technical Paper, 2016-01-0720).

[24] Kalghatgi, Gautam T.; Bradley, Derek: Pre-ignition and 'super-knock' in turbocharged spark-ignition engines. International Journal of Engine Research, 2012, Jahrgang 13, Heftnummer 4, Seite 399–414.

[25] Dahnz, Christoph; Kyung-Man, Han; Spicher, Ulrich; Magar, Max; Schießl, Robert; Maas, Ulrich: Investigations on Pre-Ignition in Highly Supercharged SI Engines. SAE Technical Paper, 2010, Heftnummer 3, Seite 214–224.

[26] Warnecke, Wolfgang; Leonhardt, Helmut; Graupner, Wolfgang; Koch, Norman: Anforderungen an Betriebsstoffe für Ottomotoren mit Direkteinspritzung. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2001, Jahrgang 62, Heftnummer 4, Seite 294–301.

[27] Spicher, Ulrich; Gohl, Marcus; Magar, Max; Hadler, Jens: Die Bedeutung des Motoröls bei der Entstehung der Vorentflammung. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2016, Jahrgang 77, Seite 62–66.

[28] Lauer, Thomas; Heiss, Michael; Bobicic, Nikola; Pritze, Stefan: Modellansatz zur Entstehung von Vorentflammungen. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2014, Jahrgang 75, Seite 64–70.

[29] Yoshihiro, Okada; Shigeki, Miyashita; Yoshihiro Izumi; Yutaka Hayakawa: Study of Low-Speed Pre-Ignition in Boosted Spark Ignition Engine. SAE Technical Paper, 2014, Heftnummer 7, Seite 584–594.

[30] Schünemann, Erik; Witt, Andreas; Selder, Markus; Schwarz, Christian: Pre-Ignition analysis on a turbocharged gasoline engine with direct injection. 4. Tagung otomotorisches Klopfen, Berlin, 2013, Seite 380–393.

[31] Zahdeh, Akram; Rothenberger, Peter; Nguyen, Wai; Muniappan, Anbarasu; Schmuck-Soldan, Simon; Schaefer, Jörg; Goebel, Thomas: Fundamental Approach to Investigate Pre-Ignition in Boosted SI Engines. SAE Technical Paper, 2011, Heftnummer 4, Seite 246–273.

- [32] Chapman, Elana; Davis, Richard; Studzinski, William; Geng, Pat: Fuel Octane and Volatility Effects on the Stochastic Pre-Ignition Behavior of a 2.0L Gasoline Turbocharged DI Engine. SAE Technical Paper, 2014, Heftnummer 7, Seite 379–389.
- [33] Cracknell, Roger; Warnecke, Wolfgang; Redmann, Jan-Hendrik; Goh, Tor Kit: Oktanbedarf bei modernen aufgeladenen Ottomotoren. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2015, Jahrgang 76, Heftnummer 7-8, Seite 16–21.
- [34] Swarts, Andre; Kalaskar, Vickey: Market Fuel Effects on Low Speed Pre-Ignition. SAE Technical Paper, 2021, Heftnummer 3, Seite 2473–2483.
- [35] Mayer, Matthias; Hofmann, Peter; Geringer, Bernhard; Williams, John; Moss, James: Influence of Different Fuel Properties and Gasoline - Ethanol Blends on Low-Speed Pre-Ignition in Turbocharged Direct Injection Spark Ignition Engines. SAE Technical Paper, 2016, Heftnummer 9, Seite 841–848.
- [36] Günther, Marco; Jakob, Markus; Morcinkowski, Bastian; Uygun, Yasar: Entwicklung geeigneter Kennzahlen zur Charakterisierung von ethanolhaltigen Kraftstoffen zur Beschreibung abnormaler Verbrennungserscheinungen. FVV-Vorhaben Nr. 1059, Bad Neuenahr 2013.
- [37] Stein, Robert et al.: Effect of Heat of Vaporization, Chemical Octane, and Sensitivity on Knock Limit for Ethanol - Gasoline Blends. SAE Technical Paper, 2012, Heftnummer 5, Seite 823–843.
- [38] Amann, Manfred; Mehta, Darius; Alger, Terrence: Engine Operating Condition and Gasoline Fuel Composition Effects on Low-Speed Pre-Ignition in High-Performance Spark Ignited Gasoline Engines. SAE Technical Paper, 2011, Heftnummer 1, Seite 274–285.
- [39] Kieberger, Markus; Hofmann, Peter; Geringer, Bernhard; Thiele, Fred; Winkler, Axel; Frambourg, Michael: Wirkung von Kraftstoffparametern auf die Vorentflammungsneigung von hoch aufgeladenen direkteinspritzenden Ottomotoren. 3. Tagung ottomotorisches Klopfen, Berlin, 2010.
- [40] Bobicic, Nikola; Hofmann, Peter; Geringer, Bernhard; Königstein, Achim; Hock, Christian; Grebe, Uwe; Schmuck-Soldan, Simon: Einfluss von Ethanolkraftstoff auf die Vorentflammungsneigung von hochaufgeladenen Ottomotoren. 3. Tagung ottomotorisches Klopfen, Berlin, 2010.

- [41] Adomeit, Philipp; Dohmen, Jürgen; Thewes, Matthias; Ewald, Jens: Einfluss von Kraftstoff und Brennverfahren auf die Vorentflammung beim aufgeladenen Ottomotor. 34. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien 2013.
- [42] Dahnz, Christoph; Kubach, Heiko; Spicher, Ulrich; Schießl, Robert: Vorentflammung und andere Selbstzündungsphänomene in Ottomotoren - Thermodynamische Untersuchungen zu Ursachen, Wirkungsweise und Vermeidung. 13. Tagung "Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors", Graz 2011.
- [43] Mayer, Mattias; Hofmann, Peter; Williams, John; Tong, Danlu: Vorentflammungseinfluss des Motoröls bei hochaufgeladenen Ottomotoren mit direkter Einspritzung. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2016, Jahrgang 77, Heftnummer 6, Seite 42–47.
- [44] Bobicic, Nikola; Hofmann, Peter; Garbe, Thomas; Hönig, Martin: Prüfverfahren zur Bestimmung der Vorentflammungsstabilität von Kraftstoffen. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2021, Jahrgang 82, Heftnummer 10, Seite 26–35.
- [45] Bobicic, Nikola; Hofmann, Peter; Geringer, Bernhard: New Test Procedure for the Determination of the LSPI-Stability of Current and Prospective Fuels. 29th Aachen Colloquim Sustainable Mobility 2020, Aachen 2020.
- [46] Günther, Marco; Uygun, Yasar; Kremer, Florian; Pischinger, Stefan: Vorentflammung und Glühzündung von Ottokraftstoffen mit Bioanteilen. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2013, Jahrgang 74, Heftnummer 12, Seite 994–1001.
- [47] Ernst, Roland: Das Phänomen Glühzündung. Ursachen, Entstehung und Vermeidung. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2002, Jahrgang 63, Heftnummer 11, Seite 916–924.
- [48] Latscha, Hans Peter; Kazmaier, Uli; Klein, Helmut: Organische Chemie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-46179-2 (2016).
- [49] Eichlseder, Helmut; Klütting, Manfred; Piock, Walter F.: Grundlagen und Technologien des Ottomotors. Wien, New York: Springer. ISBN: 978-3-211-25774-6 (2008).
- [50] William R. Leppard: The Chemical Origin of Fuel Octane Sensitivity. SAE Technical Paper, 1990, Heftnummer 4, Seite 862–876.

- [51] Prakash, Arjun; Wang, Chongming; Janssen, Andreas; Aradi, Allen; Cracknell, Roger: Impact of Fuel Sensitivity (RON-MON) on Engine Efficiency. SAE Technical Paper, 2017, Heftnummer 10, Seite 115–125.
- [52] Milpied, Jean; Jeuland, Nicolas; Plassat, Gabriel; Guichaous, Sabine; Dioc, Nathalie; Marchal, Alexandre; Schmelzle, Pierre: Impact of Fuel Properties on the Performances and Knock Behaviour of a Downsized Turbocharged DI SI Engine – Focus on Octane Numbers and Latent Heat of Vaporization. SAE Technical Paper, 2009, Heftnummer 2, Seite 118–126.
- [53] Ueckerdt, Falko; Bauer, Christian; Dirnaichner, Alois; Overall, Jordan; Sacchi, Romain; Luderer, Gunnar: Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. Nature Climate Change, 2021, Jahrgang 11, Heftnummer 5, Seite 384–393.
- [54] Tschöke, Helmut; Marohn, Ralf: 11. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe 2018. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-23180-4 (2019).
- [55] Brassat, Adrien; Thewes, Matthias; Müther, Martin; Pischinger, Stefan: Massgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse für Ottomotoren. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2011, Jahrgang 72, Heftnummer 12, Seite 988–995.
- [56] Hoppe, Fabian; Thewes, Matthias; Kremer, Florian; Pischinger, Stefan: Maßgeschneiderte Kraftstoffe für hochaufgeladene Ottomotoren. ATZextra, 2016, Jahrgang 21, Heftnummer 11, Seite 32–37.
- [57] Alt, Norbert: Nicht der Verbrennungsmotor ist das Problem, sondern der fossile Kraftstoff. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2020, Jahrgang 81, Heftnummer 3, Seite 24–27.
- [58] DIN EN ISO 5163 Mineralölerzeugnisse - Bestimmung der Klopfestigkeit von Otto- und Flugkraftstoffen - Motor-Verfahren.
- [59] DIN EN ISO 5164 Mineralölerzeugnisse - Bestimmung der Klopfestigkeit von Ottokraftstoffen - Research-Verfahren.
- [60] DIN 51756-7 Bestimmung der Klopfestigkeit von Alkoholen und Alkoholmischkraftstoffen im CFR-Prüfmotor.
- [61] Dedl, Jörg; Geringer, Bernhard; Budak, Oguz; Pischinger, Stefan: Kraftstoffkennzahlen zur Beschreibung von Vorentflammung in Ottomotoren. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2018, Jahrgang 79, Heftnummer 5, Seite 76–81.

- [62] Marzano, Mario; Nuccio, Patrizio: Experimental Analysis of the Combustion Process of Commercial and Reference Fuels on the CFR Laboratory Engine. SAE Technical Paper, 2010.
- [63] Luecke, Jon; Rahimi, Mohammad J.; Zigler, Bradley T.; Grout, Ray W.: Experimental and numerical investigation of the Advanced Fuel Ignition Delay Analyzer (AFIDA) constant-volume combustion chamber as a research platform for fuel chemical kinetic mechanism validation. Fuel, 2020, Jahrgang 265, p. 116929.
- [64] Kalghatgi, Gautam T.: Fuel Anti-Knock Quality - Part I. Engine Studies. SAE Technical Paper, 2001, Heftnummer 4, Seite 1993–2004.
- [65] Kohn, Wolfgang; Öztürk, Riza: Statistik für Ökonomen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-50441-3 (2017).
- [66] Frost, Irasianty: Einfache lineare Regression. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-19731-5 (2018).