

Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie

Technische Universität München

**Ablagerungsbildung beim Betrieb eines Dieselmotors
mit Rapsölkraftstoff**

Ursachen – Auswirkungen – Abhilfemaßnahmen

Markus Klaissle

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr. C. Zollfrank
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dr. M. Faulstich
	2. Prof. Dr. K. Schreiner (Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung)

Die Dissertation wurde am 04.10.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 06.09.2013 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Forschungs Kooperation zwischen der Technischen Universität München (Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich), der Hochschule Technik, Wirtschaft und Gestaltung Konstanz (Labor für Verbrennungsmotoren, Prof. Dr.-Ing. Klaus Schreiner), dem Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe Straubing (Sachgebiet K „Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe“, Dr. Edgar Remmele) und der Fa. SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH aus Schweinfurt.

Für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, Prof. Dr.-Ing. Klaus Schreiner und Dr. Edgar Remmele bedanken. Ebenso gilt mein Dank Univ.-Prof. Dr. Cordt Zollfrank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die finanzielle Unterstützung zur Durchführung der Untersuchungen gebührt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderprogramm „FHprofUnd“), dem Land Baden-Württemberg (Förderprogramm „Innovative Projekte“) sowie der Fa. SenerTec (insbesondere dem Bereichsleiter Technik Rudi Zilch sowie dem ehemaligen Geschäftsführer Karl Kiessling) großen Dank.

Neben vielen Mitarbeitern und Studenten der Fa. SenerTec, der HTWG Konstanz und des TFZ Straubing, die viele kleine aber dennoch wichtige Bausteine zu dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich namentlich bei Martin Hähnlen für seine Unterstützung bei der Durchführung der Prüfläufe, Jonas Wedding für die Arbeiten im Bereich der Datenauswertung sowie Markus Holzhauser für seinen akribischen Fleiß bei der Dokumentation und Beurteilung von Bauteilen bedanken.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner lieben Frau Dorothea und meinen Kindern Annika, David und Martha, die an unzähligen Abenden und Wochenenden auf ihren Ehemann und Vater verzichten mussten. Ohne ihr Verständnis und ihre andauernde Unterstützung wäre diese Arbeit niemals vollendet worden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Kurzfassung.....	1
Abstract	3
1 Einleitung.....	5
2 Stand des Wissens.....	8
2.1 Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff in Dieselmotoren	8
2.1.1 Dieselmotorische Verbrennung.....	11
2.1.2 Eigenschaften von Rapsöl	13
2.1.2.1 Phosphorgehalt.....	16
2.1.2.2 Calcium- und Magnesiumgehalt	17
2.1.3 Rapsöлтаugliche Motoren	18
2.1.4 Betriebsverhalten.....	20
2.2 Ablagerungsbildung in Verbrennungsmotoren	22
2.2.1 Ausgangsstoffe von Ablagerungen	22
2.2.2 Bildungsmechanismen von Ablagerungen.....	25
2.2.2.1 Entstehung von ablagerungsbildenden Komponenten.....	27
2.2.2.2 Transport von ablagerungsbildenden Komponenten zur Wand	27
2.2.2.3 Bildung von Ablagerungsschichten.....	28
2.2.2.4 Abtrag von Ablagerungen.....	30
2.2.3 Orte und Auswirkungen typischer Ablagerungen beim Dieselmotor.....	32
2.2.3.1 Brennraum	33
2.2.3.2 Abgasnachbehandlungssystem (Partikelfilter)	42
2.2.4 Erkennung und Diagnose von Ablagerungen.....	46
2.2.5 Verfahren zur Beurteilung von Ablagerungsbildung	48
2.2.6 Vermeidung von Ablagerungsbildung/Minimierungsstrategien bzw. Reduzierung der Auswirkungen.....	52
3 Problemstellung und Zielsetzung.....	55
3.1 Ablagerungsbildung	55
3.2 Einsatz von Rapsölkraftstoff.....	57
3.3 Zielsetzung	58

4	Theoretische Überlegungen zur Bildung, Bewertung und Erkennung von Ablagerungen.....	60
4.1	Thesen zur Bildung von Ablagerungen.....	60
4.2	Thesen zu Auswirkungen von Ablagerungen.....	61
4.3	Thesen zur Erkennung und Differenzierung von Ablagerungen.....	64
5	Experimentelle Untersuchungen zur Verifikation des theoretischen Modells.....	65
5.1	Versuchsprüfstand	65
5.2	Betriebsstoffe	70
5.2.1	Kraftstoffe.....	70
5.2.2	Schmieröl.....	71
5.3	Versuchsprogramm	71
5.3.1	Untersuchungen zum Einfluss des Kraftstoffs	72
5.3.2	Untersuchungen zum Einfluss des Betriebsprofils.....	74
5.3.3	Untersuchungen zum Einfluss der Variation des Temperaturniveaus.....	75
5.3.4	Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungen	76
5.4	Verfahren zur Auswertung der Messdaten.....	78
5.4.1	Korrektur des Betriebspunkts	80
5.4.2	Berechnung spezifischer Größen	82
5.4.3	Berechnung von Idealwerten.....	83
5.4.4	Vergleich der unterschiedlichen Korrekturverfahren	84
5.4.5	Berechnung von Ergebniswerten zeitbasierter Signalverläufe	86
5.5	Verfahren zur Komponentenbeurteilung	88
5.5.1	Einspritzdüse	89
5.5.2	Kolben/Ventile/Brennraumdecke	90
5.5.3	Partikelfilter	90
6	Ergebnisse und Diskussion der Untersuchungen zur Ablagerungsbildung	91
6.1	Einfluss des Kraftstoffs.....	91
6.1.1	Betriebsverhalten	91
6.1.2	Emissionsverhalten	100
6.1.3	Bauteilbetrachtung	104
6.1.3.1	Partikelfilter.....	104
6.1.3.2	Einspritzdüse.....	107
6.1.3.3	Kolben/Ventile/Brennraumdecke.....	115
6.2	Einfluss des Betriebsprofils.....	126

6.3 Einfluss des Temperaturniveaus.....	130
6.3.1 Voruntersuchungen zur Abschätzung des Temperaturpotenzials	130
6.3.2 Einfluss der Einspritzdüsentemperatur auf die Ablagerungsbildung.....	133
7 Ergebnisse und Diskussion der Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungen	137
7.1 Ebene 1: Ablagerungen im Motorsystem	138
7.1.1 Motorabgastemperatur	138
7.1.2 Spezifischer Kraftstoffverbrauch	138
7.1.3 Füllungsgrad der Einspritzpumpe	139
7.2 Ebene 2: Differenzierung in Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem	140
7.2.1 Einzelzylinderabgastemperatur.....	140
7.2.2 Abgasgegendruck.....	140
7.2.3 Maximaldruck im Zylinder	141
7.3 Ebene 3: Differenzierung in Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen an der Einspritzdüse	143
7.3.1 Laufunruhe	143
7.4 Ebene 4: Differenzierung in Ablagerungen außen auf der Einspritzdüsenkuppe sowie innen in der Einspritzdüse.....	145
7.4.1 Einfluss des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse.....	147
7.4.1.1 Modell zur Online-Bestimmung des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse	149
7.4.1.2 Vereinfachtes Ersatzmodell zur Online-Bestimmung des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse	155
7.4.2 Einfluss der Einspritzstrahlform bzw. Güte der Zerstäubung.....	160
7.5 Vergleich der Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung.....	162
8 Einordnung der Ergebnisse und Diskussion der Thesen.....	169
8.1 Qualität und Übertragbarkeit der Ergebnisse	169
8.2 Bewertung der Thesen zur Bildung von Ablagerungen	170
8.2.1 Einfluss der Betriebsstoffe Kraftstoff und Schmieröl.....	170
8.2.2 Einfluss des Temperaturniveaus.....	172
8.2.3 Einfluss des Betriebsprofils.....	175
8.2.4 Einfluss des Sättigungseffekts	176
8.2.5 Einfluss des Reinigungseffekts	177

8.3	Bewertung der Thesen zu Auswirkungen von Ablagerungen.....	177
8.3.1	Brennraum	178
8.3.2	Einspritzdüse	178
8.3.3	Partikelfilter	179
8.4	Bewertung der Thesen zur Erkennung und Differenzierung von Ablagerungen.....	180
8.4.1	Quantifizierung von Ablagerungsbildung anhand von Zeitreihen	180
8.4.2	Online-Erkennung von Ablagerungsbildung	181
9	Zusammenfassung und Ausblick	183
10	Literaturverzeichnis	190
Anhang A:	Messtechnik des BHKW-Prüfstands	203
Anhang B:	Detailaufnahmen der Einspritzdüsen.....	205
Anhang C:	Abbildungsverzeichnis	209
Anhang D:	Tabellenverzeichnis	214
Anhang E:	Abkürzungsverzeichnis	215
Anhang F:	Formelzeichen, griechische Symbole	216
Anhang G:	Einheiten.....	218
Anhang H:	Chemische Symbole	219
Anhang I:	Vorveröffentlichungen und Vorträge aus dem Themenkreis der Dissertation	220

Kurzfassung

Um die Klimaschutzziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen trotz steigendem Energiebedarf erreichen zu können, ist der Einsatz von Energieträgern mit möglichst geringen Treibhausgasemissionen sowie die Nutzung von Effizienztechnologien unabdingbar. Eine mögliche Umsetzung dieser Strategie ist der Einsatz von Rapsölkraftstoff in Blockheizkraftwerken.

Blockheizkraftwerke stellen hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Verbrennungsmotors. Lange Laufzeiten und Wartungsintervalle unterscheiden diese Anwendung deutlich von Motoren in Fahrzeugen. Um diese Anforderungen auch beim BHKW-Betrieb mit Rapsölkraftstoffen erfüllen zu können, ist das Verständnis von Ursachen und Auswirkungen von Ablagerungsbildung zwingend erforderlich.

Die Bildung von Ablagerungen im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem begleitet den Verbrennungsmotor bereits von seiner ersten Betriebsstunde an. In Verbindung mit neuen, alternativen Kraftstoffen gewinnt diese Thematik zunehmend an Bedeutung, da auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Kraftstoffe neue – in mineralischen Kraftstoffen nicht bekannte – Elemente enthalten können, deren Asche und andere Oxidationsprodukte zu Ablagerungen führen können. Verschiedene Untersuchungen wurden in der Vergangenheit zu dieser Thematik durchgeführt, deren Ergebnisse ergeben jedoch ein widersprüchliches Bild. Die Ursache dafür liegt zu einem großen Teil in einer nur bedingt geeigneten Untersuchungsmethodik.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an zwei baugleichen BHKW des Typs „Dachs“ (SenerTec) der Einfluss von Kraftstoffzusammensetzung, Temperaturniveau der Einspritzdüse und Betriebsprofil auf die Ablagerungsbildung untersucht.

Die Untersuchungen zu den Einflussfaktoren kraftstoffbedingter Ablagerungen basieren auf der Variation der Elementgehalte von Phosphor, Calcium und Magnesium in unverestertem Rapsölkraftstoff. Dazu wurden fünf unterschiedliche Kraftstoffzusammensetzungen definiert. Der Einfluss des Temperaturniveaus der Einspritzdüse wurde anhand der Variation der Wärmeabfuhr durch isolierten Einbau oder Wärmeleithülsen ermittelt. Die untersuchten Betriebsprofile unterscheiden sich hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Laufzeiten und Pausenzeiten.

Da die Vorgänge der Bildung und des Abbaus von Ablagerungen insbesondere im Brennraum hochdynamisch sind, wurde erstmals bei Untersuchungen rapsölkraftstoffbedingter Ablagerungen eine kontinuierliche, zeitlich hochaufgelöste Datenerfassung eingesetzt. Neben der bei verbrennungsmotorischen Untersuchungen üblichen Messung von Drücken, Temperaturen und Emissionen kam dabei auch in Langzeitprüfläufen hochwertige Indiziermesstechnik zum Einsatz.

Zur Auswertung und Komprimierung der dabei anfallenden Datenmengen wurde ein neues Verfahren zur Bestimmung des Verlaufs der Ablagerungsbildung entwickelt. Mittels Berechnung der an Kenngrößen der beschreibenden Statistik angelehnten gewichteten Signalabweichung (GSA) von zeitbasierten Messreihen sowie Differenzierung von Betriebsphasen des Ablagerungsauf- und -abbaus konnte ein bislang noch nicht beschriebenes Verhalten des Ablagerungsauf- und -abbaus erfasst und ausgewertet werden. Damit konnte die Gefahr der Fehlinterpretation von Messergebnissen deutlich reduziert werden.

Neben der klassischen Auswertung der Messdaten nach einem Prüflauf wurden weiterführende Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung am laufenden Motor untersucht.

Sämtliche Ergebnisse belegen den eindeutigen und direkten Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf die Ablagerungsbildung an allen dem Brennraum zugewandten Oberflächen sowie im Abgasnachbehandlungssystem (Partikelfilter).

Der Einfluss der Oberflächentemperatur konnte im Brennraum nachgewiesen werden, Ablagerungen bildeten sich dort zunächst an den heißeren Oberflächen. Dennoch war der Effekt der Variation der Einspritzdüsentemperatur auf die Belagsbildung an diesem Bauteil gering.

Der Einfluss des Betriebsprofils auf die Ablagerungsbildung ist nicht eindeutig, die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass positive Effekte während des Startvorgangs durch negative Effekte unverbrannter Kraftstoffreste in der Einspritzdüse nach dem Abstellen des Motors ganz oder zumindest teilweise aufgehoben werden.

Abhängig vom jeweiligen Bauteil war die durch die Kraftstoffzusammensetzung vorgegebene „Grundsteigerung“ der Ablagerungsbildung teilweise von anderen Einflüssen überlagert.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Einspritzdüse das Bauteil mit der höchsten Sensibilität gegenüber Ablagerungsbildung ist. Gleichzeitig haben an der Einspritzdüse gebildete Beläge die größte Relevanz für den Verbrennungsablauf und damit das Betriebs- und Emissionsverhalten des Motors.

Zur Online-Erfassung und -Bewertung der Ablagerungsbildung an der Einspritzdüse wurden zwei Verfahren ermittelt, anhand derer Beläge nach ihrer Auswirkung differenziert werden können. Damit ist es möglich, bei laufendem Motor sowohl den hydraulischen Durchfluss als auch die Güte der Kraftstoffzerstäubung zu beurteilen.

Die Ergebnisse zum Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung lieferten einen wesentlichen Beitrag bei der Weiterentwicklung der Vornorm für Rapsölkraftstoff (DIN V 51605) in die Norm DIN 51605. Anhand der eindeutig nachgewiesenen stark erhöhten Ablagerungsbildung bereits bei geringen Konzentrationen von Phosphor, Calcium oder Magnesium im Kraftstoff konnten die maximal zulässigen Elementgehalte von Phosphor um 75 % und von Calcium und Magnesium um 90 % gegenüber dem Wert der Vornorm abgesenkt werden.

Abstract

To achieve the goals for the reduction of greenhouse gas emissions despite of a rising demand of energy, it is vital to use energy sources with low greenhouse gas emissions as well as efficient technologies for the generation of heat and electricity. One possible route is the combustion of rapeseed oil fuel in combined heat and power plants (CHPs).

Combined heat and power plants make high demands on the reliability of the combustion engine. With long operating times and long maintenance intervals this application differs significantly from engines used in passenger cars. To fulfil these requirements even when operating on rapeseed oil fuel, reasons and effects of deposit formation have to be understood. Formation of deposits in the combustion chamber and the exhaust aftertreatment system occur in the combustion engine as of its first operating hour. In combination with new, alternative fuels this subject becomes more important, as fuels based on renewable resources can contain new elements, which are not known from mineral fuels. Ash and other oxidation products of these elements may lead to deposit formation. A number of investigations have dealt with this in the past. However, their results did not provide a clear picture. This is mostly due to the use of methods that are only suitable to a limited extent.

In this thesis, the influence of fuel composition, temperature of the injection nozzle and operating profile on the formation of deposits was investigated using two identical "Dachs" (SenerTec) type CHPs.

The experiments on the influence factors of fuel based deposits are based on the variation of Phosphorous, Calcium and Magnesium content in pure rapeseed oil fuel. Five different fuels were defined for this purpose. The influence of the injection nozzle temperature was determined by changing the heat flow rate into the cylinder head. Therefore, the nozzle holder was mounted thermally insulated and different heat conducting sleeves were used. The operating profiles used for the investigations differ in the ratio of operating time versus non-operating time.

Especially in the combustion chamber, deposit formation and decomposition are highly dynamic processes. Therefore, for the first time in investigations of rapeseed oil as fuel, continuous and high resolution data logging was used for all experiments. In addition to standard sensors for pressure, temperature and emissions, engine indication measurement was used even in long term test runs.

For evaluation and compression of the resulting data a new method was established to determine the developing of deposit formation.

By calculating the weighed signal deviation (GSA - "gewichtete Signalabweichung") based on methods of the descriptive statistics for time-based series of measurements and dividing the signal into periods with deposit formation and deposit decomposition, the behaviour of deposit formation and decomposition could be described in a new level of detail. This leads to a significantly reduced risk of misinterpretation of measurements.

Aside from the classical evaluation of data after a test run, further methods for online-detection of deposit formation while the engine was running were investigated.

All results prove the unambiguous and direct influence of fuel composition on deposit formation on all surfaces facing the combustion chamber as well as in the exhaust aftertreatment system (particulate filter).

Influence of the surface temperature could be proven for the combustion chamber. Deposits start growing in hot areas. However, the variation of the temperature of the injection nozzle on deposit growth at this part was non-influential.

Influence of the operating profile is not clear. However, the results show that positive effects during the engine start were nearly fully compensated by effects caused by remains of unburned fuel in the injector after stopping the engine.

Depending on the engine part, the generally ascending slope of deposit formation due to fuel composition was partly superimposed from other effects.

The investigations show, that the injection nozzle is the most sensitive part to deposit formation. Furthermore, nozzle deposits have the highest relevance for the combustion process and therefore for operating behaviour and emissions on an engine.

Two methods for online-recording and -quantification of deposit formation at the injection nozzle were established. They can be used to quantify the hydraulic flow rate and the quality of the fuel nebulisation while the engine is running.

The results on the influence of fuel composition supported the further development of the pre standard for rapeseed oil fuel (DIN V 51605) into the standard DIN 51605. Due to the clear proof, that even with a small concentration of Phosphorous, Calcium and Magnesium in the fuel, deposit formation is raised significantly, the limit values for Phosphorous could be reduced by 75 % and for Calcium and Magnesium by 90 %, based on the limit values defined in the pre standard for rapeseed oil fuel.

1 Einleitung

Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen (THG) ist inzwischen von vielen Regierungen als erforderliche Maßnahme zum Klimaschutz erkannt worden [183] [18]. Zur Erfüllung dieser Ziele bestehen prinzipiell mehrere Möglichkeiten:

- Steigerung der Energieeffizienz
- Einsatz von Energieträgern mit geringeren Treibhausgasemissionen

Zur Steigerung der Energieeffizienz besteht in Deutschland noch großes Potential. Derzeit werden Strom und Wärme noch immer überwiegend getrennt erzeugt. Während moderne Heizsysteme Wirkungsgrade nach 100 % erreichen, lag der durchschnittliche Gesamtwirkungsgrad der Stromerzeugung in Deutschland 2007 bei etwa 41,7 % [182]. Folglich stammen ca. 40 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland aus der Erzeugung von Strom, obwohl der Stromanteil am Gesamtenergieverbrauch nur 21 % beträgt [47].

In Schwellenländern wie z. B. China führen fortschreitende Industrialisierung und Bevölkerungswachstum zu einem stark ansteigenden Primärenergiebedarf, der bislang jedoch noch immer durch eine überwiegende Nutzung von fossilen Energieträgern gedeckt wird. Deren beschränkte Verfügbarkeit bedingt, dass diese zukünftig verstärkt durch erneuerbare Energiequellen substituiert und deren Verbrauch durch energieeffizientere Prozesse gesenkt werden müssen.

Vor dem Hintergrund der hohen Energieeffizienz fordert z. B. auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) in seinem Sondergutachten „Klimaschutz durch Biomasse“ einen verstärkten Ausbau der kombinierten Strom- und Wärmenutzung. [92]

Aus technischer Sicht bietet die Verwendung von biogenen Kraftstoffen in BHKW-Anlagen aufgrund der hohen Gesamtwirkungsgrade ein (auch im Vergleich zur Verwendung als Kraftstoff im Verkehrssektor) sehr großes CO₂-Minderungspotential. Dabei kommt den durch Syntheseprozesse aus Ganzpflanzen hergestellten Biokraftstoffen der zweiten Generation aufgrund mangelnder Verfügbarkeit derzeit praktisch keine Bedeutung zu, relevant sind ausschließlich Pflanzenölkraftstoffe der ersten Generation. Im Bereich der Klein-BHKW wird aufgrund der regionalen Verfügbarkeit und der Logistik sowie den Anforderungen an die Lagerung des Kraftstoffs nahezu ausschließlich Rapsöl eingesetzt. Dabei besteht die Möglichkeit, neben industriell hergestelltem Rapsölvollraffinat auch kaltgepresstes Rapsöl aus dezentralen Ölmühlen zu verwenden. Abbildung 1 zeigt das THG-Einsparpotential verschiedener biogener Kraftstoffe. Dabei bietet Rapsölkraftstoff mit 57 % mit das höchste THG-Minderungspotential für Biokraftstoffe aus heimischen Rohstoffen.

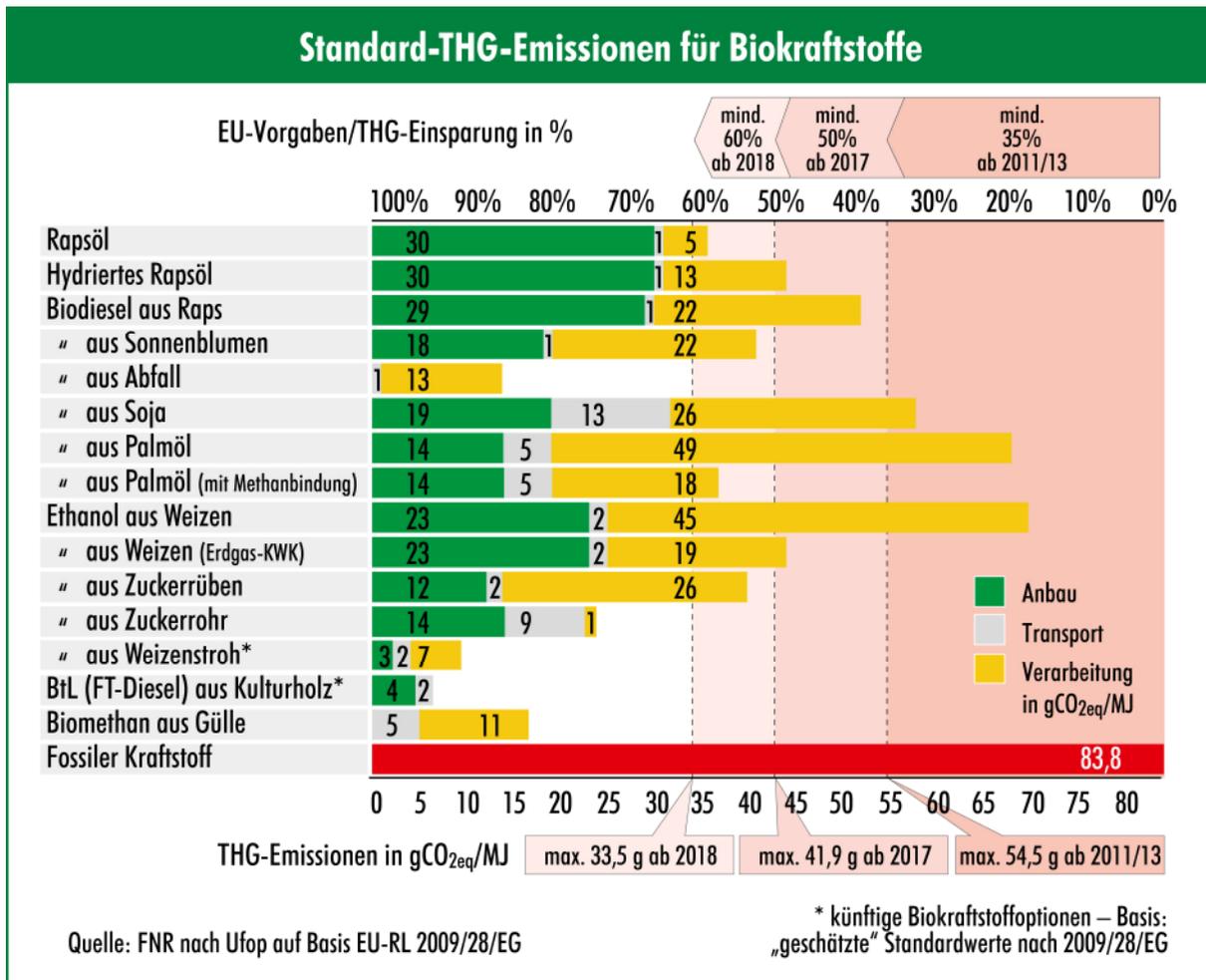


Abbildung 1: Standard-THG-Emissionen für Biokraftstoffe [45]

Diesem hohen THG-Einsparpotential stehen jedoch ethische und technische Herausforderungen gegenüber.

Insbesondere flüssige biogene Kraftstoffe, welche direkt aus den Früchten der Pflanzen gewonnen werden („Kraftstoffe der ersten Generation“) und damit auch Pflanzenölkraftstoffe sind in der letzten Zeit jedoch zunehmend in Kritik geraten, da sowohl ihre Ökobilanz (Gesamt-THG-Emissionen vom Acker bis in den Tank) als auch ihre ethische Berechtigung („Teller oder Tank“, energetische Verwendung von Lebensmitteln) vermehrt in Frage gestellt werden. Der zunehmende Einsatz von biogenen Kraftstoffen wird dabei oft als Hauptverursacher für die Kostenexplosion bei Nahrungsmitteln genannt. In der zugrunde liegenden Studie der Weltbank [172] wird jedoch vernachlässigt, dass diese Kostenexplosion überwiegend durch das starke wirtschaftliche Wachstum in Schwellenländern (zunehmender Energiebedarf, Umstellung der Ernährungsgewohnheiten) sowie die gestiegenen Produktionskosten (höhere Energiepreise) verursacht wird [187]. Dennoch muss auch für biogene Kraftstoffe sichergestellt werden, dass die Gesamtheit der ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen durch Produktion und Nutzung keine Verschlechterung gegenüber fossilen Energieträgern darstellt [48].

Die technischen Fragen der Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen wurden in der Vergangenheit immer wieder anhand der zu den jeweiligen Zeiten aktuellen Motorkonzepte untersucht. Treiber für entsprechende Untersuchungen waren dabei meist Preis oder Verfügbarkeit von mineralischen Kraftstoffen.

In Deutschland erlangte die Nutzung von Rapsölkraftstoff durch die auf nationaler und europäischer Ebene definierten Klimaschutzziele ab 2000 zunehmende Bedeutung, sowohl in mobilen Anwendungen als auch im Bereich der Stationärmotoren und Blockheizkraftwerke (BHKW).

Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren und den damit einhergehenden steigenden Anforderungen an die Kraftstoffqualität rückte dabei die Frage nach einer Rapsölkraftstoffqualität zunehmend in den Vordergrund. Diese muss einerseits den motorischen Anforderungen gerecht werden, andererseits aber auch eine wirtschaftliche Ölgewinnung auch in dezentralen Ölmühlen ermöglichen.

In diesem Gebiet wurden in den vergangenen Jahren große Fortschritte erzielt, die sich in immer präziseren Qualitätsdefinitionen für Rapsölkraftstoff widerspiegeln [137] [114] [86] [144] [36], dennoch ist der Einfluss bestimmter Kraftstoffeigenschaften noch nicht ausreichend geklärt und bietet Raum für eine weitere Verbesserung der Kraftstoffqualität.

Beim Einsatz von Rapsölkraftstoff in modernen Verbrennungsmotoren mit Abgasnachbehandlungssystemen ist hauptsächlich die Ablagerungsbildung in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem kritisch für den sicheren Betrieb und die Dauerhaltbarkeit. Einige vorangegangene Untersuchungen (z. B. im Rahmen des „100-Traktoren-Demonstrationsprojektes“ des BMELV) berichten von schlechtem Betriebsverhalten bis hin zum Ausfall der Motoren aufgrund von Ablagerungsbildung. [70] [113] [71]

Die Ursache für die Ablagerungsbildung ist jedoch oft nicht vollständig geklärt, vermutet wird in der Regel eine Kombination aus Betriebsprofil und Kraftstoffzusammensetzung. Dabei sind insbesondere die Grenzwerte für den Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium sehr umstritten, da deren grundsätzlicher Einfluss auf die Ablagerungsbildung zwar akzeptiert ist, Wechselwirkungen mit anderen Einflussgrößen und die Relevanz derartiger Ablagerungen jedoch uneinheitlich bewertet werden.

Abhängig vom Herstellungsverfahren des Rapsölkraftstoffs handelt es sich hierbei um die Kraftstoffkenngrößen, die einen starken Einfluss auf die Prozesskosten der Ölgewinnung ausüben [143].

Der aus Gesamtwirkungsgradaspekten vorteilhafte Einsatz im BHKW stellt sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Betriebs. So liegen die jährlichen Betriebsstunden typischerweise deutlich über denen anderer Anwendungen. Bei entsprechendem Wärmebedarf sind Laufzeiten über 8000 Stunden pro Jahr keine Seltenheit. Dies entspricht einer Fahrstrecke von 400.000 km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h.

Weiterhin erfolgt bei BHKW in der Regel eine kontinuierliche Überwachung der Motorleistung, so dass auch temporärer Leistungsmangel aufgrund von Störungen in der Verbrennung sofort erkannt wird und in der Regel zu einer Fehlerabschaltung des BHKW führt.

Aus diesem Grund ist das Verständnis der Ursachen und Auswirkungen von Ablagerungsbildung für den erfolgreichen Betrieb von KWK-Anlagen mit Biokraftstoffen sehr wichtig. Sind diese Mechanismen verstanden, können sowohl kraftstoff- als auch motorensseitig die entsprechenden Maßnahmen eingeleitet werden.

2 Stand des Wissens

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Stand des Wissens der Themengebiete „Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff in Dieselmotoren“ und „Ablagerungsbildung in Verbrennungsmotoren“ dargestellt. Die Ausführungen beschränken sich jeweils auf die für die Zielsetzung dieser Arbeit relevanten Teilgebiete.

2.1 Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff in Dieselmotoren

Pflanzenöle stellen zusammen mit Ethanolkraftstoffen die zwei tragenden Säulen der derzeit verfügbaren Biokraftstoffe dar. Während Ethanolkraftstoffe nahezu ausschließlich in Ottomotoren eingesetzt werden, finden Pflanzenölkraftstoffe ihre Anwendung in Dieselmotoren.

Die Nutzung von Pflanzenölen als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren reicht bis in die Anfänge des Dieselmotors zurück. Bereits Rudolf Diesel erwähnte die Möglichkeit, einen Dieselmotor nicht nur mit Mineralöldestillaten, sondern auch mit pflanzlichen Ölen zu betreiben [38]. Im Jahr 1937 untersuchte Gaupp die Eignung verschiedener pflanzlicher Öle als Kraftstoff in Dieselmotoren [56]. Dennoch spielte die Nutzung von Pflanzenölen als Kraftstoff lange Zeit keine Rolle. Erst zu Beginn der 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts wurden vor allem in Deutschland und den USA erneut Untersuchungen zur Nutzung des Alternativkraftstoffs in den inzwischen deutlich weiter entwickelten Motoren durchgeführt. Durch die in den vergangenen Jahren auf nationaler und Europäischer Ebene definierten Klimaschutzziele gewann die Nutzung von Biokraftstoffen weiter an Bedeutung. So lassen sich z. B. die für den Transportsektor in der EU-Richtlinie 2003/30/EG festgelegten Biokraftstoffquoten nur durch einen verstärkten Einsatz von biogenen Kraftstoffen erzielen [44]. Neben dem Einsatz von Pflanzenöl- und Ethanolkraftstoffen in Reinform bedingt dies auch eine erhöhte Beimischquote zu fossilen Kraftstoffen.

In den Jahren 2000 bis 2007 erlebte die Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen in verschiedenen motorischen Anwendungen im Mobilitätssektor einen starken Boom. Mit Inkrafttreten der stufenweisen Besteuerung ab Mitte 2006 wurde dieser Aufwärtstrend gestoppt. Während die erste Steuerstufe von 0,0 ct/l ab 1. August 2006 noch keine Auswirkungen auf den Verbrauch hatte, spiegeln sich die folgenden, ab 2008 jeweils zum 1. Januar eines Jahres in Kraft getretenen Stufen deutlich in Verbrauch und Umsatz wieder. Insbesondere Fuhrparkbetreiber, die aus Wirtschaftlichkeitsgründen auf Rapsölkraftstoff umgestiegen sind, wechselten wieder zurück zu fossilem Dieselmotorkraftstoff, der – auch aufgrund der Finanz- und Wirtschaftskrise – in Deutschland teilweise unter dem Preis für Rapsölkraftstoff angeboten wurde. Abbildung 2 zeigt diese Verbrauchsentwicklung über die letzten 40 Monate [17].

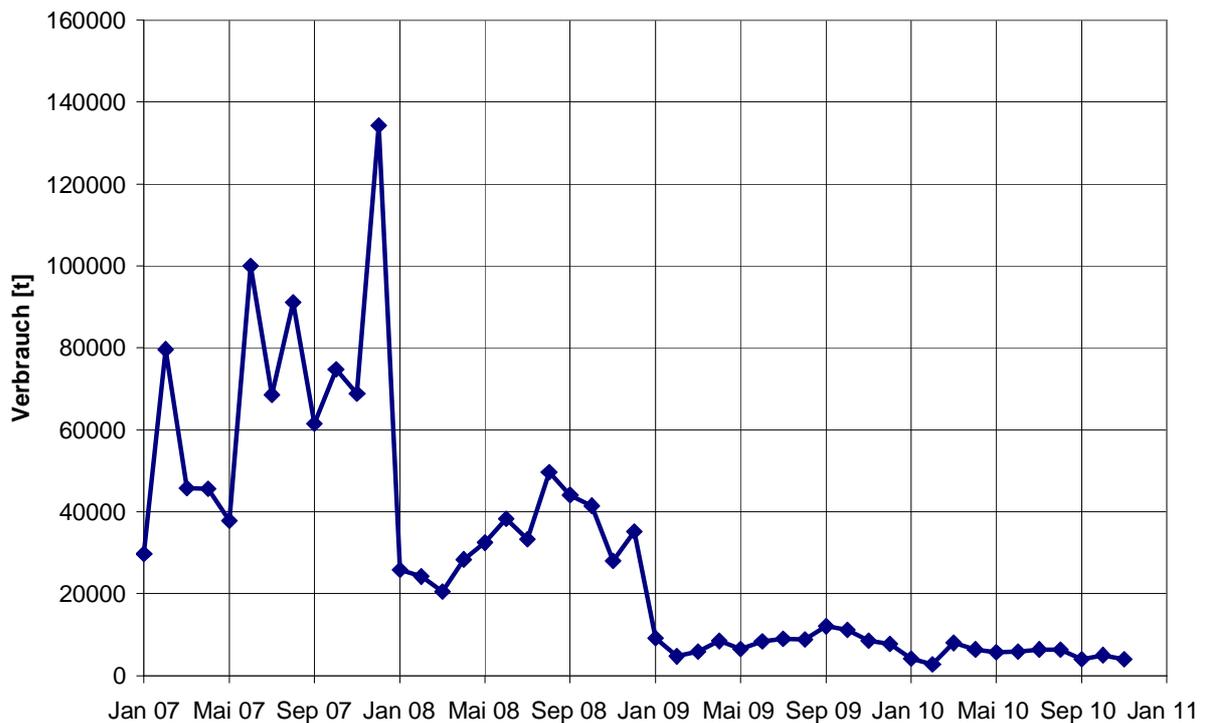


Abbildung 2: Verbrauch an Pflanzenölkraftstoffen in Deutschland [17]

Während im Dezember 2007 (unmittelbar vor Einführung der zweiten Steuerstufe von 8,15 ct/l) noch 134.266 t verbraucht wurden, waren es im Dezember 2008 (unmittelbar vor Einführung der dritten Steuerstufe von 16,55 ct/l) nur noch 35.173 t. Seither beträgt der mittlere Verbrauch nur noch knapp 7.500 t pro Monat. Aus diesem Grund beschränkt sich das Haupteinsatzgebiet von Rapsölkraftstoff in mobilen Anwendungen inzwischen auf Nischenanwendungen in der Landwirtschaft. Der wirtschaftliche Einsatz ist dabei von der Energiesteuer-Rückerstattung für fossilen Agrardiesel abhängig.

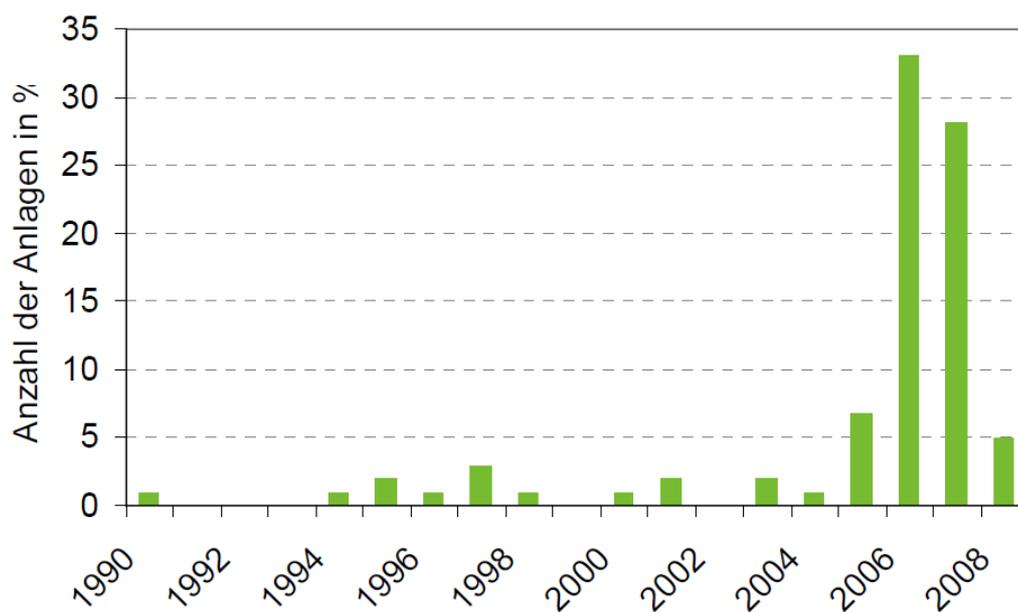


Abbildung 3: Verteilung der Anlagenbaujahre von 90 Pflanzenöl-BHKW (Betreiberbefragung durch DBFZ) [173]

Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in Blockheizkraftwerken wird seit August 2004 durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) gesondert vergütet. Abbildung 3 zeigt den dadurch ausgelösten Boom anhand der vom DBFZ im Rahmen einer Betreiberbefragung erhobenen Daten zum Baujahr von BHKW im Leistungsbereich von kleiner 10 kW_{el} bis größer 1000 kW_{el}. Die Verzögerung resultiert aus der erforderlichen Planungszeit für die BHKW.

Seit Mitte 2007 sind die Pflanzenölpreise aufgrund schlechter Ernteerträge und einer zunehmenden Nachfrage (auch im Lebensmittelbereich) stark angestiegen, was sich in einer deutlich niedrigeren Zahl von Neuanlagen widerspiegelt. Verstärkt wurde dieser Rückgang durch die erwarteten Änderungen bei der Neufassung des EEG. [173]

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) erachtet in seinem Sondergutachten „Klimaschutz durch Biomasse“ den Einsatz von Biomasse in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen aufgrund der großen Treibhausgaseinsparpotenziale als besonders erstrebenswert [92]. Diese Vorteile werden bei regionaler Nutzung (geringer Transportaufwand durch kurze Wege und hohe Energiedichte) und Verwendung der Koppelprodukte (z. B. des Presskuchens als Futtermittel) weiter verstärkt. Zusätzlich bietet die schnelle biologische Abbaubarkeit und geringe Ökotoxizität des Kraftstoffs Vorteile beim Einsatz in umweltsensiblen Gebieten. [177]

Bedingt durch die Anbausituation in der Landwirtschaft wurden in der Vergangenheit in Deutschland hauptsächlich rapsölstämmige Pflanzenölkraftstoffe verwendet (Rapsmethylester (RME, „Biodiesel“), kaltgepresstes Rapsöl, Rapsölvollraffinat). In anderen Ländern lag der Schwerpunkt auf anderen Ölsorten, hauptsächlich Soja- und Sonnenblumenöl. Diese regionalen bzw. kontinentalen Unterschiede haben sich in den letzten Jahren stark angeglichen. Hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kommt auch in Deutschland insbesondere in größeren BHKW immer mehr importiertes Soja- und Palmöl zum Einsatz.

Die Herstellung von Pflanzenöl kann nach unterschiedlichen Verfahren erfolgen. In industriellen Ölmühlen kommt eine Heißpressung mit anschließender Raffination zum Einsatz, wohingegen dezentralen Ölmühlen nach dem Verfahren der Kaltpressung arbeiten. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Prozessschritte beider Verfahren. [146]

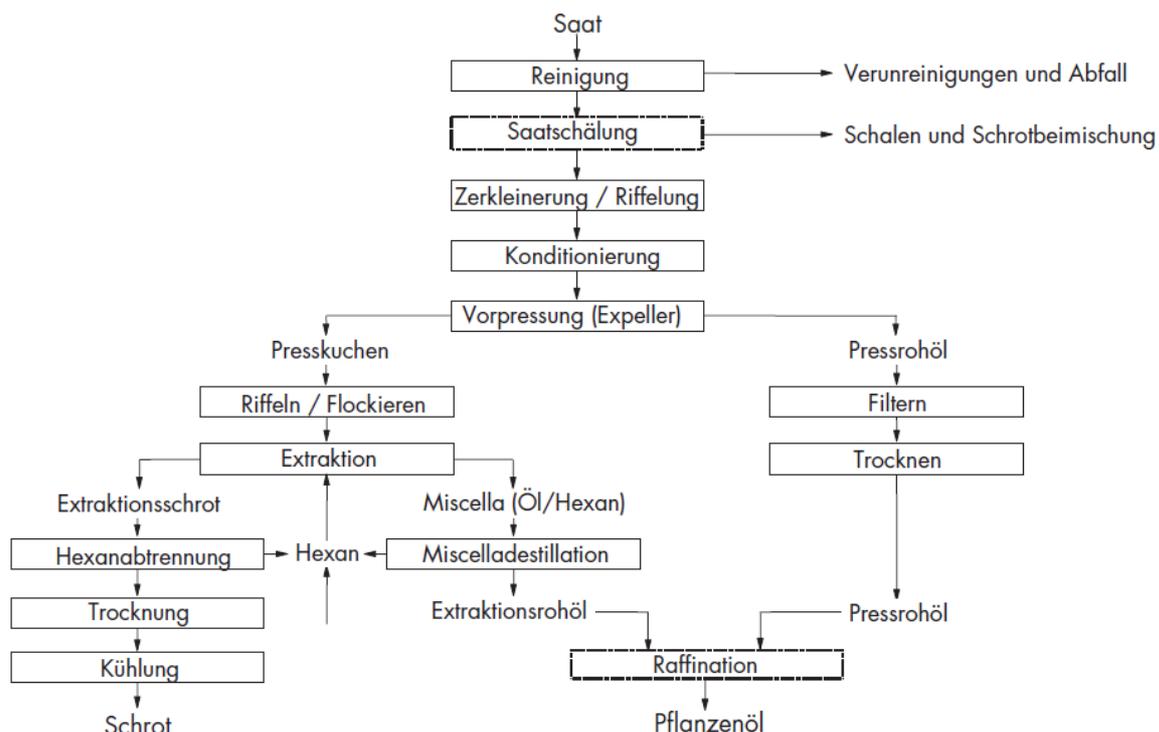


Abbildung 4: Ölsaatenverarbeitung in (zentralen) industriellen Ölmühlen [146]

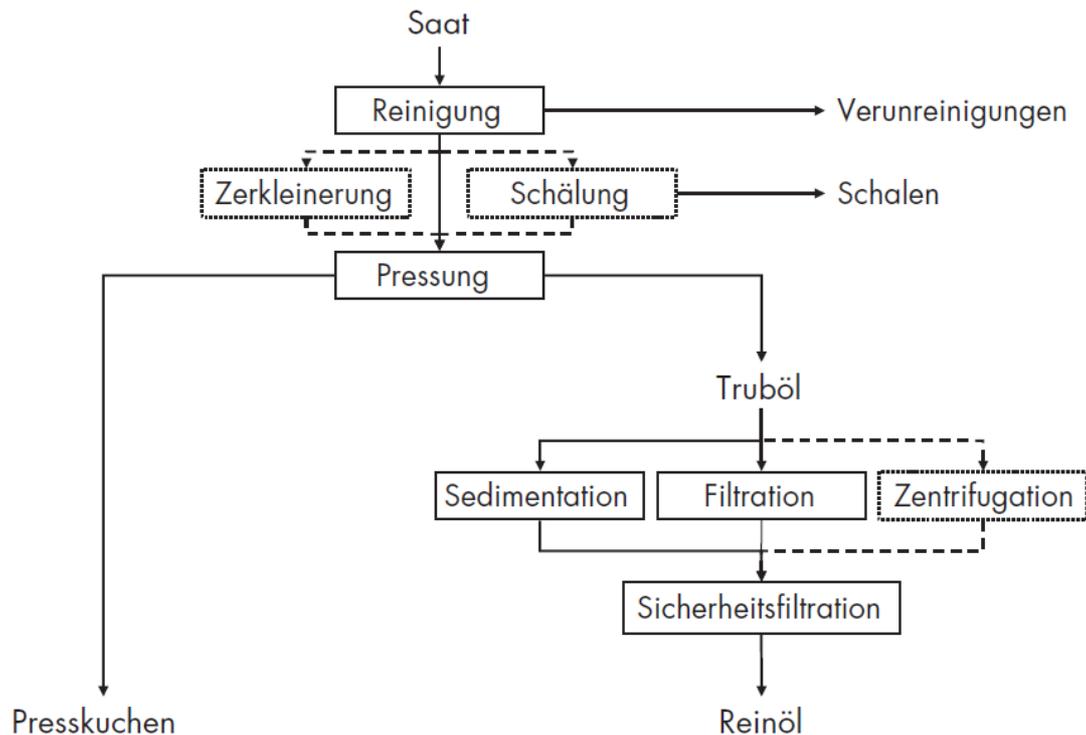


Abbildung 5: Ölsaatenverarbeitung in (dezentralen) Kleinanlagen [146]

Neben Raps-Methyl-Ester (RME, Biodiesel) wird in letzter Zeit auch vermehrt wieder der Einsatz von hydrierten Pflanzenölen (HVO, Hydrotreated Vegetable Oils) diskutiert. Die Hydrierung kann dabei entweder zusammen mit Mineralölkomponenten in Mineralölraffinerien [6] [152] oder ohne Mineralölkomponenten in speziell dafür konzipierten Anlagen erfolgen. Ziel ist in beiden Fällen die Erzeugung eines dieselähnlichen Kraftstoffs auf zumindest teilweiser Basis von Pflanzenölen. [75]

Die bislang genannten Kraftstoffe basieren auf dem direkt aus der Ölpflanze gewonnenen Pflanzenöl (Kraftstoffe der „ersten Generation“). Daneben existieren in der Gruppe der Biokraftstoffe „zweiter Generation“ BtL-Kraftstoffe (BtL = Biomass to Liquid), zu deren Herstellung die gesamte Biomasse vergast und anschließend mittels Fischer-Tropsch-Synthese in einen flüssigen Kraftstoff umgewandelt wird. Basis dieser BtL-Kraftstoffe können nicht nur Ölpflanzen, sondern jegliche Art von Biomasse sein. [108]

Neben technischen Aspekten wird die energetische Verwendung von Biomasse zunehmend auch unter ethischen Gesichtspunkten diskutiert. Insbesondere die Bilanz der Treibhausgasemissionen bei einer kompletten Betrachtung der Prozesskette von der Erzeugung bis zur energetischen Verwendung sowie die Auswirkungen von steigendem Biomasseverbrauch auf Lebensmittelpreise und Anbauverhalten der Landwirtschaft (Konkurrenz um Ackerflächen, Gefahr von Monokulturen) werden von verschiedenen Institutionen sehr unterschiedlich bewertet. Weitere Informationen dazu sind z. B. bei Widmann und Remmele [187] und Dürnberger et al. [39] zu finden.

2.1.1 Dieselmotorische Verbrennung

Dieselmotoren kommen in verschiedensten Anwendungsgebieten und entsprechend vielfältigen Baugrößen und Ausführungen zum Einsatz. Im Bereich der Stationärmotoren zur Verbrennung flüssiger Kraftstoffe hat sich der Dieselmotor deutlich gegenüber dem Ottomotor durchgesetzt, hauptsächlich aufgrund des thermodynamisch bedingt besseren Wirkungsgrads und der weit-

aus ungefährlicheren Brennstofflagerung. Neben dem Arbeitsverfahren (2-Takt oder 4-Takt) liegt der konstruktive Hauptunterschied von Dieselmotoren im Brennverfahren. In der Vergangenheit kamen überwiegend indirekt einspritzende Motoren zum Einsatz, bei denen der Kraftstoff in einen Nebenbrennraum (Vor- oder Wirbelkammer) eingespritzt wird, der über einen Kanal mit dem Hauptbrennraum verbunden ist. Bis auf wenige Ausnahmen wurde dieses mit höheren Wandwärme- und Strömungsverlusten behaftete Brennverfahren inzwischen durch ein direkt einspritzendes Brennverfahren ersetzt. Hierbei wird der Kraftstoff direkt in den Hauptbrennraum eingespritzt. Aus den konstruktiven Unterschieden beider Brennverfahren resultiert eine unterschiedliche Sensitivität des Motors gegenüber kraftstoffbedingter Ablagerungsbildung, wie verschiedene Untersuchungen belegen. [150] [113] [144]

Beim der dieselmotorischen Verbrennung handelt es sich um ein selbstzündendes Brennverfahren, bei dem Kraftstoff gegen Ende des Kompressionstakts unter hohem Druck in die verdichtete Luft im Brennraum eingespritzt wird. Der Einspritzverlauf und der Strahlerfall des eingespritzten Kraftstoffs bestimmt dabei maßgeblich den Ablauf der Verbrennung und damit das Betriebs- und Emissionsverhalten des Motors. In Abbildung 6 ist der Ablauf der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung dargestellt. Insbesondere der Zündverzug zwischen Beginn der Einspritzung und Beginn der Verbrennung hat großen Einfluss auf Kraftstoffverbrauch, Laufgeräusch und Emissionsverhalten. [120]

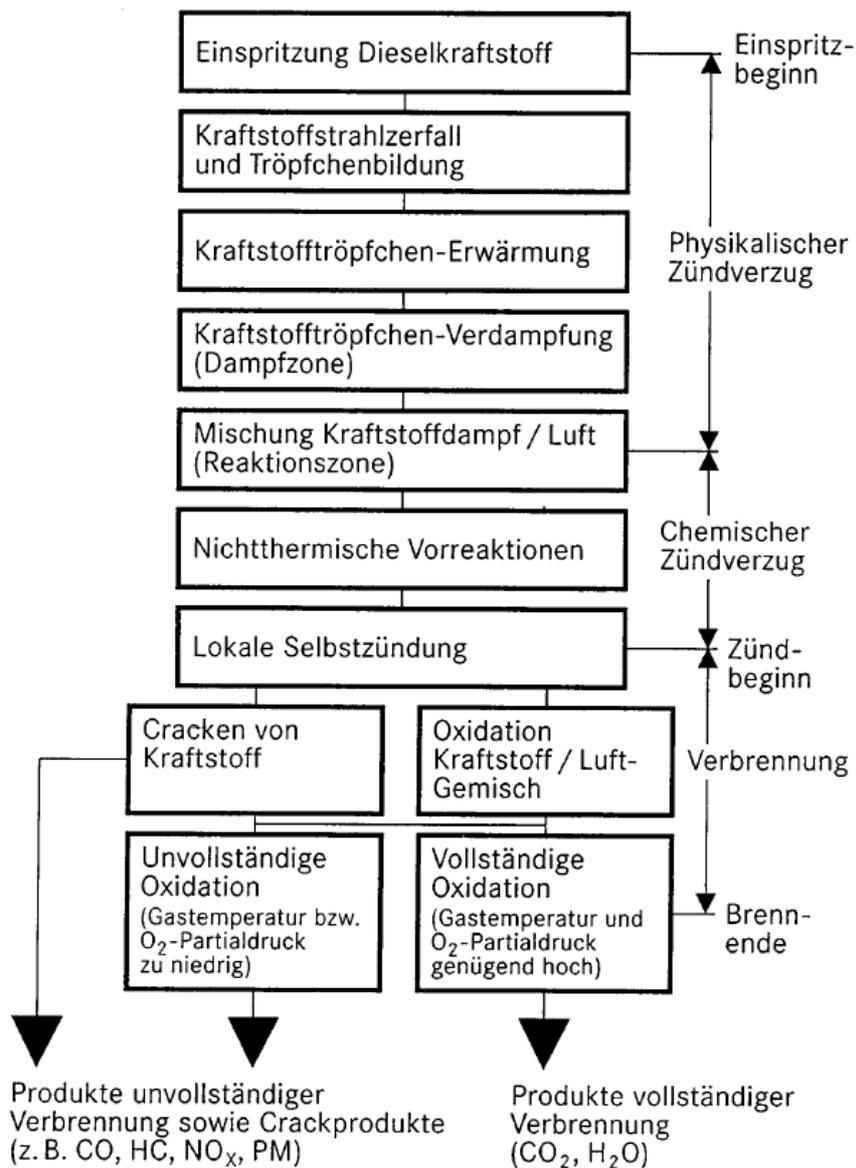


Abbildung 6: Sequentielle Darstellung der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung [120]

2.1.2 Eigenschaften von Rapsöl

Rapsölkraftstoffe unterscheiden sich sowohl in physikalischer als auch in chemischer Hinsicht in einigen Punkten von mineralischem Dieselkraftstoff. Die für die Anwendung als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren wichtigsten Unterschiede werden nachfolgend beschrieben.

Allen Pflanzenölen gemeinsam ist die überwiegende Zusammensetzung aus Triglyceriden (dreiwertiger Alkohol Glycerin plus drei Fettsäuren). Abbildung 7 zeigt den typischen Aufbau eines Triglycerids.

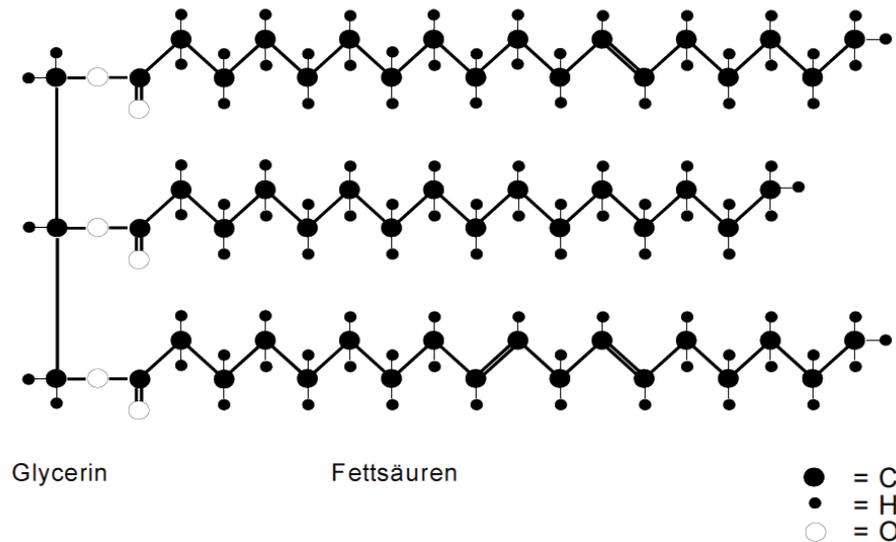


Abbildung 7: Typischer Aufbau eines Triglycerids [176]

Je nach Anzahl der Doppelbindungen der Fettsäuren können diese gesättigt, einfach ungesättigt oder mehrfach ungesättigt sein. Das Verhältnis der einzelnen Fettsäuren zueinander ist dabei charakteristisch für das jeweilige Pflanzenöl. Dieses Fettsäuremuster bestimmt wesentliche Eigenschaften des Öls wie z. B. Flammpunkt, Siedeverlauf, Alterungsbeständigkeit und kinematische Viskosität. Neben den Triglyceriden können im Pflanzenöl auch abgespaltene freie Fettsäuren, Mono- und Diglyceride sowie weitere Begleitstoffe (z. B. Phospholipide) vorkommen [147].

In Tabelle 1 sind wichtige Kenngrößen von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff und Biodiesel dargestellt. Die Werte entstammen den jeweiligen Normen, dort nicht spezifizierte Angaben stammen aus weiteren Literaturquellen. [35] [34] [36] [10]

Auffällig ist die in diesem Vergleich niedrige Cetanzahl von Rapsöl gegenüber Dieselkraftstoff und Rapsmethylester. Als Maß für die Zündfähigkeit eines Kraftstoffs ist die Cetanzahl eine wichtige verbrennungsrelevante Kenngröße. Eine niedrige Cetanzahl beschreibt einen hohen Zündverzug und damit zu schlechterem Kaltstartverhalten, höheren Druckerhöhungsgradienten (härteres Laufgeräusch) und erhöhten NO_x -Emissionen [147].

Die klassischen Methoden zur Bestimmung der Cetanzahl im Prüfmotor nach DIN 51773 (BASF-Prüfmotor) bzw. nach DIN EN ISO 5165 (CRC-Prüfmotor) eignen sich aufgrund der höheren Viskosität jedoch nicht für Rapsölkraftstoff. Ein alternatives Verfahren unter Verwendung eines „Fuel Ignition Testers“ mit konstantem Brennraumvolumen wurde von Attenberger [5] untersucht und als geeignet bewertet. Die Vergleichbarkeit dieser abgeleiteten Cetanzahl (ACZ) mit der in einem Prüfmotor ermittelten Cetanzahl muss jedoch noch weiter verifiziert werden.

Tabelle 1: Wichtige Kenngrößen von Rapsöl, Dieseldieselkraftstoff und Rapsmethylester

Kenngröße	Einheit	Rapsöl DIN V 51605	Dieseldieselkraftstoff DIN EN 590	Rapsmethylester DIN EN 14214
Dichte (15 °C)	kg/m ³	900 bis 930	820 bis 845	860 bis 900
Kohlenstoffgehalt	Masse-%	77	87	77
Wasserstoffgehalt	Masse-%	12	13	12
Sauerstoffgehalt	Masse-%	11	0	11
Cetanzahl		> 39	> 51	> 51
Heizwert, massebezogen	kJ/kg	ca. 37500	ca. 43000	ca. 37200
Heizwert, volumetrisch	kJ/l	ca. 34500	ca. 35700	ca. 32800

Neben den genannten Kenngrößen unterscheidet sich Rapsöl von mineralischem Dieseldieselkraftstoff weiterhin durch

- die hohe Viskosität,
- den Siedeverlauf,
- die Oberflächenspannung, sowie
- die geringere Kompressibilität.

Der temperaturabhängige Verlauf der Viskosität eines Pflanzenöls wird maßgeblich vom Fettsäuremuster bestimmt, weiteren Einfluss nimmt der Grad der Ölalterung. Der Flammpunkt bzw. die Siedelinie werden durch den Anteil an freien Fettsäuren eines Öls beeinflusst, mit zunehmendem Anteil an freien Fettsäuren sinkt der Flammpunkt.

Durch das höhere Niveau des Siedebeginns beginnt die Verdampfung des Kraftstoffs im Motor erst zu einem späteren Zeitpunkt, wodurch die Gemischbildung negativ beeinflusst wird. Die hohe kinematische Viskosität und die große Oberflächenspannung führen ebenfalls zu einer schlechteren Zerstäubung des eingespritzten Kraftstoffs. Weiterhin sind unveresterte Pflanzenölkraftstoffe aufgrund der höheren Viskosität schwerer fließ- und pumpfähig als Dieseldieselkraftstoff. [164]

Die geringere Kompressibilität führt dazu, dass der von der Einspritzpumpe ausgehende Druckimpuls mit einer geringeren Verzögerung (Einspritzverzug) auf die Einspritzdüse – und damit den Einspritzstrahl – übertragen wird. [186]

Aufgrund der großen möglichen Schwankungen von Kraftstoffzusammensetzung und -qualität und den daraus möglicherweise resultierenden Problemen im Motorbetrieb sowie der Problematik, dass verschiedene Hersteller von Pflanzenölmotoren unterschiedliche Anforderungen an die Pflanzenölqualität stellen, wurde bereits 1992 eine Standardisierung bzw. Normung von Rapsölkraftstoff von verschiedenen Autoren dringend gefordert. [149] [114]

Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Entwicklung des Qualitätsstandards für Rapsölkraftstoff bis hin zum Stand der Vornorm DIN V 51605.

Tabelle 2: Entwicklung von Grenzwerten für Rapsölkraftstoff

Eigenschaft	Einheit	Grenzwert				
		Vorschlag von Pryde (1982) [137] für einen Pflanzenölkraftstoffstandard (1982)	1. Vorschlag Qualitätsstandard (1992) [114]	Vorl. RK-Qualitätsstandard 08/1996 [86]	RK-Qualitätsstandard 05/2000 [144]	DIN V 51605 (seit 9/2003) [36]
Charakteristische Eigenschaften						
Dichte bei 15 °C	kg/m ³	k. A.	900...930			
Flammpunkt	°C	k. A.	> 55	> 300	> 220	
Kin. Viskosität bei 40 °C	mm ² /s	k. A.		< 38		< 36
Heizwert	kJ/kg	k. A.	> 35.000			>36.000
Zündwilligkeit		k. A.	ca. 39	> 38	k. A.	> 39
Koksrückstand	% (m/m)	k. A.	< 0,5	< 0,03	< 0,4	
Iodzahl	g Iod / 100g	80...140	< 115	< 120	100..120	95...125
Schwefelgehalt	mg/kg	k. A.	< 30		< 20	< 10
Variable Eigenschaften						
Gesamtverschmutzung	mg/kg	k. A.		< 25		< 24
Neutralisationszahl	mg KOH/g	k. A.	< 1,5		< 2,0	
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	k. A.			> 5,0	> 6,0
Phosphorgehalt	mg/kg	< 200	< 30	< 25	< 15	< 12
Summengehalt an Calcium und Magnesium	mg/kg	k. A.				< 20
Aschegehalt (Oxidasche)	% (m/m)	< 0,05	< 0,02		< 0,01	
Wassergehalt	% (m/m)	< 0,02	< 0,1		< 0,075	

Die Weiterentwicklung der ursprünglichen Grenzwerte ist dabei sowohl auf den Zugewinn an Wissen zurückzuführen, resultiert zu einem großen Teil aber auch aus der Verbesserung von Prüfmethoden und der kontinuierlichen Fortentwicklung der Motoren und Einspritztechnik, woraus sich neue Anforderungen an den Kraftstoff ergeben. Grundsätzlich steht insbesondere die Definition von Grenzwerten für die variablen Eigenschaften im Zielkonflikt der verschiedenen Interessen von Motorenherstellern und Kraftstoffproduzenten. Die einzelnen charakteristischen und variablen Eigenschaften von Rapsölkraftstoff, deren Abhängigkeiten sowie deren motorische Relevanz sind z. B. bei Remmele [147] im Detail besprochen.

Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Einfluss von Rapssorte, Zustand der Saat und den Parametern der Pressung sowie der Lagerung findet sich in den Arbeiten von Remmele et al. zur Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich [143] [146].

2.1.2.1 Phosphorgehalt

Der Phosphorgehalt gilt – neben Gesamtverschmutzung und Neutralisationszahl – als besonders kritisch für die Anwendung von Rapsöl als Kraftstoff [11]. Er wurde bereits sehr früh als grundsätzlich relevante Kenngröße bei der Verwendung von Pflanzenölen als Kraftstoff erkannt. So werden z. B. 1982 in einer Arbeit von Pryde [137] zur Standardisierung von Pflanzenölkraftstoffen folgende Auswirkungen von Phosphor im Kraftstoff genannt:

- Schleimbildung im Kraftstofftank;
- nicht genauer benannte „Effekte im Motor“

Bei der Ölgewinnung in dezentralen Anlagen wird der Phosphorgehalt des Rapsöls hauptsächlich durch die Reife der Saat und die Temperatur und den Abpressgrad bei der Pressung bestimmt. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge lassen sich auch in dezentralen Ölmühlen Phosphorgehalte deutlich unterhalb der Grenzwerte der DIN V 51605 erzielen. [114] [143] Eine Möglichkeit zur weiteren Absenkung des Phosphorgehalts ist die anschließende Behandlung mit Zuschlagstoffen (z. B. Bleicherde, Tonerde, Cellulose, Silikagel) [191]. Derzeit werden an verschiedenen Forschungseinrichtungen entsprechende Untersuchungen durchgeführt [192].

Beim Heißpressen in industriellen Ölmühlen muss das Öl in einem sich anschließenden Raffinationsprozess entschleimt und entsäuert werden. Dabei kann der Phosphorgehalt auf einen sehr niedrigen Wert (unterhalb der Nachweisgrenze von 0,5 mg/kg) eingestellt werden. [114]

Phosphor liegt in Pflanzenölen in Form von Phospholipiden vor, freie Phosphate sind nicht enthalten [137] [144] [189]. Die Phospholipide können Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen und schleimartige Verbindungen im Öl bilden. Eine schnelle Verstopfung des Kraftstofffilters aufgrund des hohen Phosphorgehalts (90 mg/kg) stellte Maurer [149] im Rahmen von Motorprüfstandsuntersuchungen fest. Diese Gefahr der Kraftstofffilterverstopfung aufgrund der Hydratisierung (Quellung im Wasser) wird auch von Remmele et al. [144] erwähnt; zusätzlich verringert sich mit steigendem Anteil an Phospholipiden die Oxidationsstabilität des Pflanzenöls.

Weiterhin wird die Wirkung von Phosphor als Katalysatorgift genannt, insbesondere bei Oxidationskatalysatoren (ähnlich Schwefel), sowie die Absenkung der Verbrennungstemperatur durch Phosphor. Durch die geringere Verbrennungstemperatur lagert sich (mehr) unverbrannter Kraftstoff an den Brennraumwänden an und kann auf diese Art in das Schmieröl gelangen. Zudem kann Phosphor im Brennraum zu Ablagerungen führen.

Trotz des langen Zeitraums der Betrachtung von Phosphor unter motorischen Aspekten herrschte lange Jahre Uneinigkeit über den tatsächlich erforderlichen Grenzwert. Erst in der letzten Zeit werden die Aussagen in der Literatur zunehmend einheitlicher.

Richter et al. betrachten in [149] Rapsöl als Kraftstoff für Dieselmotoren als geeignet, sofern der Phosphorgehalt durch Kaltpressung oder Heißpressung mit anschließender Entschleimung unter 300 mg/kg liegt. Maurer dagegen nennt 30 mg/kg als einen möglichen Grenzwert, gibt

aber gleichzeitig zu Bedenken, dass dieser für Motoren mit kleinen Zylindervolumina noch zu hoch sein könnte [114]. In Untersuchungen von Pudel [138] wird berichtet, dass Brennraumablagerungen zum größten Teil aus Phosphor bestehen. Da sich aber nur ca. 0,35 % des im Kraftstoff enthaltenen Phosphors als Rückstände im Brennraum ablagern, kann nach Meinung von Pudel auf eine Begrenzung des Phosphatgehalts generell verzichtet werden. Neuere Untersuchungen zur Verträglichkeit von Abgasnachbehandlungssystemen mit Pflanzenölkraftstoffen fordern dagegen Phosphor-Grenzwerte im Bereich der Nachweisgrenze (< 1 mg/kg) [198].

Die Gründe für diese scheinbar widersprüchlichen Aussagen sind vielfältig:

- Das grundsätzliche Verbrennungsprinzip eines pflanzenöлтаuglichen Dieselmotors (Vor-/Wirbelkammer oder Direkteinspritzer) ist von entscheidender Bedeutung für die Sensitivität der Verbrennung gegenüber Ablagerungsbildung. [150] [113]
- Das Betriebsverhalten von Kammermotoren ist bauartbedingt wesentlich robuster als das von direkteinspritzenden Dieselmotoren. Zu dieser Erkenntnis gelangen sowohl die Untersuchungen von Maurer [113] als auch von Remmele et al. [144]. Beide kommen zu dem Schluss, dass direkteinspritzende Seriendieselmotoren, die nicht speziell für den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoffen umgerüstet wurden, für Rapsölbetrieb nicht geeignet sind.
- Ein Einfluss des Betriebsprofils auf die Auswirkungen von Phosphor im Kraftstoff wird vermutet [16] [114]. Im Vollastbetrieb sind – vermutlich aufgrund der höheren Verbrennungstemperaturen – höhere Phosphorkonzentrationen tolerierbar als im Takt- oder Teillastbetrieb; hier wirkt sich die Absenkung der Verbrennungstemperatur durch Phosphor wesentlich gravierender aus [144]. Bei einigen Untersuchungen ist jedoch das verwendete Betriebsprofil nicht oder nur unzureichend beschrieben.
- In der Regel wurden keine Versuchsreihen mit unterschiedlichen Phosphorgehalten unter ansonsten gleichen Randbedingungen durchgeführt, sondern lediglich eine vorliegende Kraftstoffzusammensetzung hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung bewertet (z. B. bei Richter et al. [149] 90 mg/kg Phosphor). Eine Ausnahme stellt die Untersuchung von Maurer [114] dar; hier wurde ein 6-Zylinder-Pflanzenölmotor so umgebaut, dass jeder Zylinder mit einer anderen Rapsölqualität betrieben werden konnte. Eine genaue Beschreibung der zylinderspezifischen Veränderungen erfolgte jedoch nicht.
- Je nach Art eines eventuell vorhandenen Abgasnachbehandlungssystems (katalytisch beschichteter Träger, Wall-Flow-Partikelfilter, etc.) sind zusätzlich zu den Vorgängen im Brennraum weitere Effekte (Katalysatorvergiftung, Partikelfilterbeladung) zu berücksichtigen.
- Die Anforderungen an die Dauer eines störungsfreien Betriebs bzw. dafür erforderliche Wartungsintervalle variiert je nach Anwendungsfall. Daraus ergeben sich unterschiedliche zulässige Grenzwerte für einzelne Kraftstoffbestandteile.

2.1.2.2 Calcium- und Magnesiumgehalt

Im Gegensatz zum Phosphorgehalt, welcher bereits von Anbeginn der Untersuchungen zur Verwendung von Raps- bzw. Pflanzenölen als Kraftstoff betrachtet wurde, wurde dem Gehalt an den Erdalkalielelementen Calcium und Magnesium lange Zeit kaum Beachtung geschenkt. Einzig in der bereits 1994 vorgestellten Arbeit von Pudel [138] stehen Calcium und Magnesium an zweiter bzw. vierter Stelle der Verursacher der Brennraumablagerungen. Dennoch wurde erst 2003 im Zuge der Überführung des Qualitätsstandards für Rapsölkraftstoff in den Entwurf einer DIN-Norm ein Summengrenzwert für Calcium und Magnesium eingeführt. Krause [96] erwähnt im Jahr 2005 neben Phosphor auch Magnesium als Quelle für Brennraumablagerungen. Zur gleichen Zeit gibt es bei Remmele [145] Hinweise auf die Gefahr von Brennraumablagerungen durch Calcium. Die Untersuchungen von Remmele zeigen eine sehr gute Korrelation zwischen dem Phosphorgehalt und dem Calciumgehalt unterschiedlicher Rapsölkraftstoffproben aus dezentraler Ölgewinnung (siehe Abbildung 8).

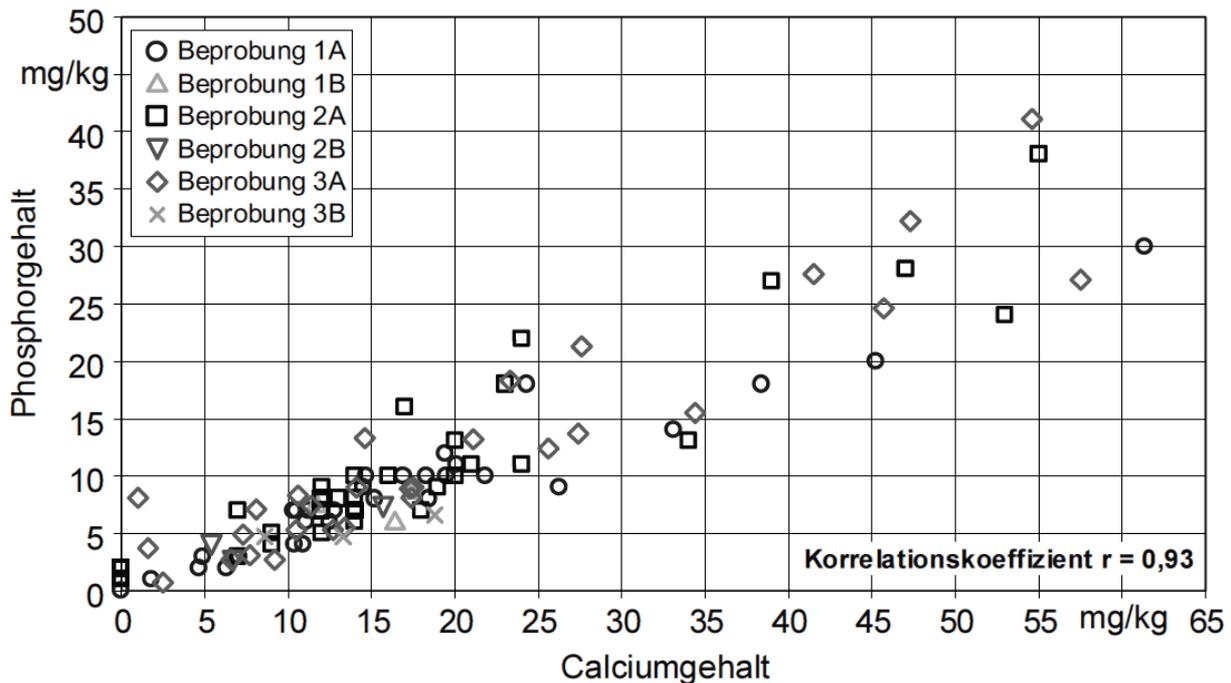


Abbildung 8: Korrelation zwischen Calciumgehalt und Phosphorgehalt von Rapsölproben [145]

In einer weiteren Arbeit von Remmele et al. [143] ist das Verhältnis von Calcium zu Magnesium im Rapsöl mit ca. 9 zu 1 angegeben.

Motorische Untersuchungen zum Einfluss des Calcium- und Magnesiumgehalts eines unveresterten Rapsölkraftstoffs sind nicht bekannt. Aus Untersuchungen mit Rapsmethylester ist jedoch zu entnehmen, dass erhöhte Erdalkaligehalte zu Ablagerungen im Brennraum, auf den Düsenadeln und auf den Auslassventilen führen. [190]

2.1.3 Rapsöлтаugliche Motoren

Eine Definition eines pflanzenöлтаuglichen Motors findet sich in der DIN V 51605 [36], dort wird in diesem Zusammenhang ein „Motorsystem, welches für die Verwendung von Pflanzenölen als Kraftstoff konzipiert oder durch nachträgliche Umrüstungsmaßnahmen für die Verwendung von Pflanzenölen als Kraftstoff angepasst wurde, und für das entsprechende Freigaben bzw. Garantieerklärungen des Motorherstellers oder des Umrüsters vorliegen“ genannt.

Abweichend von dieser Definition werden Vor- und Wirbelkammermotoren älterer Bauart oft ohne jegliche Umrüstung oder Anpassung mit Pflanzenölkraftstoff betrieben. Diese – unter Berücksichtigung des Betriebs- und Emissionsverhaltens zweifelhafte – Vorgehensweise ist bei modernen direkteinspritzenden Motoren nicht möglich, hier sind Anpassungsarbeiten für einen sicheren Betrieb unumgänglich. Dabei kann zwischen Ein- und Zweitanksystemen unterschieden werden, siehe dazu die Grafik von Remmele [145] (Abbildung 9).



Abbildung 9: Einordnung von pflanzenötauglichen Motoren nach dem Kraftstoffsystem [145]

Neben der Umrüstung von Seriendieselmotoren wurden in der Vergangenheit auch speziell für den Einsatz mit Rapsölkraftstoff konstruierte Motoren gebaut. Dabei wurde meist auf das von Elsbett entwickelte Duotherm-Brennverfahren in Verbindung mit Gelenk- bzw. Pendelschaft- oder Ferrothermkolben zurückgegriffen. [83] [19]

Heute spielen diese Motoren keine Rolle mehr, aktuelle pflanzenötaugliche Motoren basieren fast ausschließlich auf Großserien-Dieselmotoren. Die dabei eingesetzten Umrüstmaßnahmen variieren in Art und Umfang sehr stark. Eine umfassende Beschreibung der einzelnen Maßnahmen findet sich bei Jurisch und Meyer-Pittroff [83], Widmann [188], Remmele [147] oder Thuneke et al. [175].

Beim Eintanksystem wird der Motor in sämtlichen Betriebszuständen ausschließlich mit Pflanzenöl betrieben. Neben der Herausforderung des sicheren Kaltstarts muss dabei insbesondere bei direktinspritzenden Motoren der Verbrennung im Schwach- und Teillastbetrieb erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden, um auch bei niedrigeren Brennraumtemperaturen eine vollständige Verbrennung des eingespritzten Kraftstoffs sicherzustellen. Anderenfalls besteht – neben schlechtem Betriebs- und Emissionsverhalten – die Gefahr des Eintrags von großen Mengen an unverbranntem Kraftstoff in die Schmierölwanne.

Beim Zweitanksystem wird zusätzlich zum bestehenden Kraftstoffkreislauf ein zweiter Kraftstoffkreislauf aufgebaut. Damit ist es möglich, den Motor in bestimmten kritischen Betriebszuständen ganz oder teilweise mit Diesel oder RME zu betreiben. Je nach Betriebszustand ist dafür jedoch eine gewisse Vorlaufzeit erforderlich, z. B. um das Einspritzsystem vor dem Abstellen rechtzeitig mit Diesel oder RME zu spülen. Alternativ kann der zweite Kraftstoff auch ausschließlich für den Betrieb einer Standheizung zur Motorvorwärmung verwendet werden. [186]

Der Einsatz von Additiven als Teil eines Umrüstkonzeptes ist nur von einem Umrüster bekannt. [43]. Zusätzlich bietet ein Ölhändler ein Kraftstoffadditiv an, welches unabhängig von Vorhandensein oder der Art einer Umrüstung eingesetzt werden kann [68].

Unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung der einzelnen Umrüstkonzepte lässt sich eine grobe Unterteilung auch in Maßnahmen der ersten und zweiten Generation vornehmen. Maßnahmen der ersten Generation widmeten sich in der Regel der erhöhten Viskosität von

Pflanzenöl durch Einsatz von Kraftstoffvorwärmungen und Kraftstoffleitungen mit größeren Querschnitten.

Maßnahmen der zweiten Generation betrachten darüber hinaus das unterschiedliche Verbrenungsverhalten von Pflanzenölkraftstoffen. Dies geschieht in der Regel durch Eingriff in die Motorsteuerung (Anpassung von Einspritzzeitpunkt und -verlauf). Mit diesen Maßnahmen wird beispielsweise der Schlepper Agrottron NaturalPower von Deutz für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet [154]. Die Möglichkeiten moderner Pumpe-Düse- oder Common-Rail-Einspritzsysteme zur individuellen Parametrierung des Einspritzvorgangs im gesamten Kennfeld bieten dabei noch großes Potenzial bei der Weiterentwicklung der Pflanzenölverbrennung [164].

Mechanische Anpassungen von Brennraum oder Ventilen finden nur in Ausnahmefällen statt, am ehesten erfolgt noch ein Austausch der Einspritzdüsen. Weitere Maßnahmen, die einem geänderten Ablagerungsverhalten von Rapsölkraftstoff gegenüber mineralischem Dieselmotorkraftstoff Rechnung tragen, sind bei aktuellen Umrüstungen nicht bekannt.

Aufgrund des niedrigen Schwefelgehalts von Rapsölkraftstoff ist der Einsatz von Oxidationskatalysatoren, SCR-Katalysatoren und NO_x -Speicher-katalysatoren in Kombination mit Rapsölkraftstoff prinzipiell möglich [186]. Allerdings müssen diese Systeme sehr genau auf den jeweiligen Motor bzw. Kraftstoff abgestimmt werden [198], weshalb bei entsprechend ausgerüsteten Motoren hier im Rahmen einer Umrüstung eine Neuabstimmung der Systemkomponenten aufeinander erforderlich ist. Auch dabei ist wiederum die Wirkung von kraftstoffstämmigen Katalysatorgiften zu beachten.

Der Einsatz von Partikelfiltersystemen ist differenzierter zu betrachten. Partikelemissionen, Partikelzusammensetzung und Partikelanzahl beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff unterscheiden sich deutlich vom Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. Daraus resultiert ein anderes Beladungs- und Regenerationsverhalten. Zusätzlich können die in Rapsölkraftstoffen oft höheren Aschegehalte zu einer nicht reversiblen Filterbeladung führen. Neben der funktionalen Abstimmung von Abgasnachbehandlungskonzepten im Neuzustand besteht das Hauptproblem derzeit noch in der Dauerhaltbarkeit unterschiedlicher Systeme beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Dazu sind eine Gesamtbetrachtung von Kraftstoff, Motor und Abgasnachbehandlung sowie eine Anpassung der Kraftstoffnorm an die Anforderungen insbesondere moderner Partikelfiltersysteme erforderlich. [198]

Eine ausführliche Untersuchung der Eignung verschiedener Partikelfiltersysteme für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurde von Thuneke [177] durchgeführt.

2.1.4 Betriebsverhalten

Das Betriebsverhalten eines rapsölbetriebenen Dieselmotors muss unter zwei Fragestellungen betrachtet werden:

- Wie verhält sich der Motor grundsätzlich im Vergleich zum Betrieb mit anderen Kraftstoffen (Dieselmotorkraftstoff, RME, etc.)?
- Wie ändert sich das motorische Verhalten über der Betriebszeit?

Die erste Frage widmet sich ausschließlich der Verbrennung selbst. Hier spielen hauptsächlich die charakteristischen Eigenschaften von Rapsöl im Vergleich zu anderen Kraftstoffen eine Rolle. Wie sich ein rapsöлтаuglicher Motor im Vergleich zu seinem „Diesel-Pendant“ verhält, hängt dabei maßgeblich von der Art und Ausführung der Motorumrüstung ab (siehe auch Kapitel 2.1.3), weshalb in der Literatur teilweise unterschiedliche Aussagen zu finden sind. Inzwischen ist allgemein anerkannt, dass bei einer Umrüstung eines Motors auf Pflanzenölbetrieb auch eine Neuabstimmung der Verbrennung erforderlich ist. Daher können Untersuchungen mit nicht oder nur unzureichend angepassten Motoren als nicht mehr dem Stand der Technik entsprechend angesehen werden. Diese Problematik wurde bereits in einer Zusammenfassung der Emissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren von Tschöke dargestellt [179]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Kern und Widmann in einer Literaturstudie [87]. Untersuchungen nicht ausreichend angepasster Motoren werden daher nicht weiter betrachtet.

Aufgrund der Unterschiede in Viskosität, Siedeverlauf und Oberflächenspannung von Rapsöl im Vergleich zu mineralischem Dieselkraftstoff unterscheidet sich die Ausbreitung und Verdampfung eines Rapsöl-Kraftstoffstrahls erheblich von dem eines Diesel-Kraftstoffstrahls. Wie Richter [149] bereits 1991 festgestellt hat, führt dies bei unverändertem Einspritzsystem zu schlechterer Gemischbildung und schlechterer bzw. unvollständiger Verbrennung.

Bedingt durch die ständige Weiterentwicklung der Motorentechnik (insbesondere der Einspritzsysteme) widmen sich auch heute noch einige Untersuchungen der Strahlausbreitung und Gemischaufbereitung von Rapsölkraftstoff bei moderner Einspritztechnik. Die wichtigsten Arbeiten in diesem Gebiet wurden in den letzten Jahren von Hopp und Prescher (2003) sowie Spicher und Lüft (2007) durchgeführt.

Hopp und Prescher [76] führten Untersuchungen zur Ausbreitung der Einspritzstrahlen eines Common-Rail-Systems in Abhängigkeit von Raildruck und Kraftstoff durch. Dabei wurde der Raildruck in zwei Stufen variiert (850 bar; 1350 bar), als Kraftstoff kamen mineralischer Dieselkraftstoff, RME, Rapsöl bei 50 °C und Rapsöl bei 80 °C zum Einsatz. Bedingt durch die höhere dynamische Viskosität des Rapsöls sind die Einspritzstrahllängen im Vergleich zu Dieselkraftstoff oder RME kürzer. Die Unterschiede waren bei niedrigem Raildruck (850 bar) größer als bei hohem Raildruck. Ein Einfluss der Temperatur des eingespritzten Rapsöls auf die Einspritzstrahllänge war erkennbar, jedoch nicht signifikant. Beim Strahlkegelwinkel ist dagegen ein Einfluss der Rapsöltemperatur deutlich erkennbar, der Strahlkegelwinkel des kalten Rapsöls ist deutlich breiter als der von heißem Rapsöl oder Dieselkraftstoff. Die Autoren schließen daraus, dass insbesondere bei kaltem Rapsöl und niedrigen Einspritzdrücken (Teillast) eine Anpassung der Ansteuerzeiten des Injektors erforderlich ist.

Der weiterführenden Arbeit von Spicher und Lüft [164] werden die Auswirkungen von Kraftstofftemperatur, Einspritzdruck und Einspritzkammerdruck auf das Strahlbild der Zerstäubung von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff untersucht. Dabei kommt sowohl ein nockengesteuertes als auch ein Common-Rail-Einspritzsystem zur Anwendung. Die Beurteilung der Einspritzstrahlen erfolgt sowohl in einer Atmosphärenkammer als auch in einer Druckkammer. Im Unterschied zu Hopp und Prescher stellten Spicher und Lüft bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff längere und schlankere Einspritzstrahlen fest. Dadurch wird die Vermischung mit der Luft erschwert, zusätzlich besteht durch die größere Strahllänge die Gefahr der direkten Wandbenetzung. Durch Erwärmung des Rapsöls kann das Strahlbild dem von Dieselkraftstoff zwar angenähert werden, es bleiben jedoch deutliche Unterschiede in der Gemischbildung bestehen. Gleiches gilt für die Anhebung des Einspritzdrucks. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass, um eine dem Dieselkraftstoff entsprechende Zerstäubungsgüte zu erreichen, eine Optimierung der Düsengeometrie und gegebenenfalls der gesamten Einspritzanlage erforderlich ist.

Aus den Unterschieden in Strahlausbreitung und Gemischaufbereitung und der Zusammensetzung von Rapsölkraftstoff resultiert ein vom Betrieb mit Dieselkraftstoff abweichendes Emissionsverhalten, welches bei der Umrüstung und Neuabstimmung des Motors berücksichtigt werden muss. [69] [12] [42]

Eine Vielzahl von weiteren Untersuchungen widmet sich der Ablagerungsbildung im Brennraum. Die Autoren kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die Ablagerungsbildung deutlich ausgeprägter ist als beim Betrieb mit mineralischem Dieselkraftstoff. Schwerpunkte bilden dabei die Einspritzdüsen und die Kolbenringe. Insbesondere Ablagerungen an der Einspritzdüse führen zu einer Verschlechterung des Strahlbilds und folglich zu einer unvollständigen Verbrennung. Daraus resultieren weitere Probleme wie z. B. erhöhte Schmierölalterung durch Eintrag von Verbrennungsprodukten und unverbranntem Kraftstoff, weitere Ablagerungsbildung im Brennraum, erhöhter mechanischer Verschleiß des Motors sowie eventuell Korrosionsschäden. [13] [72] [94] [134] [149] [167] [184]

Eine differenziertere Betrachtung einzelner Untersuchungsergebnisse erfolgt in Kapitel 2.2.1, 2.2.2 und 2.2.3.

Leider werden in vielen Veröffentlichungen zum Betriebsverhalten von rapsölbetriebenen Dieselmotoren keine genauen Angaben zum eingesetzten Kraftstoff bzw. zur eingesetzten Kraftstoffzusammensetzung gemacht. Nur in Ausnahmefällen wurden gezielt bestimmte Kraft-

stoffe verwendet [113] [114]. Ebenso fehlen teilweise genaue Angaben zum Betriebsprofil der Motoren, so dass auch hier Quervergleiche schwierig sind [149].

2.2 Ablagerungsbildung in Verbrennungsmotoren

Das Problem der Ablagerungsbildung im Brennraum und im Abgasnachbehandlungssystem von Verbrennungsmotoren ist so alt wie der Verbrennungsmotor selbst. Aufgrund einer immer strenger werdenden Abgasgesetzgebung, immer leistungsfähigeren Motoren und ständig steigenden Anforderungen an die Laufkultur ist Ablagerungsbildung trotz stetiger Weiterentwicklung von Kraft- und Schmierstoffen ein nach wie vor aktuelles bzw. sogar an Bedeutung gewinnendes Thema in der Motorenindustrie. [32]

Ablagerungsbildung in Verbrennungsmotoren ist ein höchst komplizierter Vorgang, der sich aus einer Reihe verschiedener chemischer und physikalischer Teilprozesse zusammensetzt. Die dabei ablaufenden Mechanismen sind von der Zusammensetzung der Ausgangsprodukte (Luft, Kraftstoff, Schmieröl, Abriebstoffe), den Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur, Feuchte) und der zur Verfügung stehenden Reaktionszeit abhängig.

Trotz der unzähligen Arbeiten, die sich bis heute mit der Thematik auseinander gesetzt haben, existieren noch immer widersprüchliche Aussagen zur Ablagerungsbildung unter scheinbar gleichen Randbedingungen. Die nachfolgende Literaturübersicht versucht daher, anhand von sechs Leitfragen den für diese Untersuchung relevanten Stand des Wissens zu gruppieren. Soweit für das Verständnis hilfreich, erfolgt dabei teilweise auch ein Blick über die direkte Aufgabenstellung dieser Arbeit hinaus zu anderen Kraftstoffen oder Motorentypen.

Die sechs Leitfragen sind:

- 1) Aus welchen Ausgangsstoffen entstehen Ablagerungen?
- 2) Wie bilden sich Ablagerungen?
- 3) Wo bilden sich Ablagerungen und was sind deren Auswirkungen?
- 4) Wie können Ablagerungen erkannt werden?
- 5) Wie können Ablagerungen beurteilt werden?
- 6) Welche Möglichkeiten gibt es, Ablagerungen bzw. deren motorische Auswirkungen zu verringern?

Soweit erforderlich, sind die Leitfragen in den jeweiligen Kapiteln noch weiter untergliedert.

2.2.1 Ausgangsstoffe von Ablagerungen

Grundsätzlich kann es bei jedem Verbrennungsmotor während des Betriebs zu einem Aufbau von Ablagerungen vor, im und nach dem Brennraum kommen.

Quelle dieser Ablagerungen können Zwischenprodukte einer unvollständigen Verbrennung oder nicht brennbare Verbrennungsrückstände von Kraftstoff und Schmierstoff sowie Partikel aus der angesaugten Luft sein. Durch die Reinigung der Ansaugluft mit handelsüblichen Filtern kann der Eintrag von ablagerungsbildenden Komponenten auf diesem Weg heute vernachlässigt werden. Ebenso vernachlässigt werden kann – bei normalem Verschleiß des Motors – der Beitrag von mechanischem Abrieb aus Lagern, von Kolbenringen etc. Lediglich in Untersuchungen von Grütering et al. [63] und Givens et al. [59] wurde Eisen aus dem mechanischen Verschleiß des Motors eine signifikante Rolle bei der Beladung eines Dieselpartikelfilters (DPF) zugesprochen. Der anteilige Einfluss der beiden anderen möglichen Quellen – Kraftstoff und Schmierstoff – variiert je nach Bauart, Verschleißzustand und Betriebsprofil des Motors sowie nach Zusammensetzung von Kraftstoff und Schmierstoff.

Bedingt durch die stetige Weiterentwicklung sowohl von Kraft- als auch von Schmierstoffen hat sich das Verhältnis der Ablagerungsursachen zwischen beiden Komponenten immer wieder gewandelt. Aus diesem Grund sind Aussagen in der Literatur zur Relevanz der beiden Komponenten nicht eindeutig, sondern stark abhängig vom Entwicklungsstand der jeweiligen Kraft- und Schmierstoffe. Beide Medien treten auf unterschiedlichen Wegen in den Brennraum ein, weshalb eine getrennte Betrachtung angebracht ist. [88] [155]

Kraftstoff

Bis auf sehr wenige Untersuchungen zur Ablagerungsbildung, die – vermutlich aufgrund des auf jeweils eine Sorte Kraftstoff beschränkten durchgeführten Versuchsprogramms – keinen Einfluss des Kraftstoffs auf die Ablagerungsbildung nennen [158] [102], ist der Kraftstoffeinfluss auf die Ablagerungsbildung bei Verbrennungsmotoren generell akzeptiert.

Je nach Kraftstoffzusammensetzung bestehen Brennraumablagerungen bei Verwendung mineralischer Kraftstoffe aus ca. 50 % Kohlenstoff. Die übrigen Bestandteile verteilen sich auf Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor und Zink [151]. Lepperhoff und Houben [103] erwähnen neben den organischen Ablagerungsbestandteilen Kohlenstoff, Kohlenwasserstoffe, Sauerstoff und Zink auch anorganische Bestandteile wie Schwefel, Metalle, Barium und Calcium. Nach Eilts [41] bestehen Ablagerungen zunächst aus oxidierten Kohlenwasserstoffen. Die dabei gebildeten Harze binden anschließend Rußpartikel aus der Verbrennung. In Untersuchungen zum Ablagerungsverhalten schwefelhaltiger Kraftstoffe wurde festgestellt, dass Kraftstoffe mit einem hohen Schwefel- und Aromatengehalt die Ablagerungsbildung fördern [89] [117].

Im Zusammenhang mit mineralischen Diesekraftstoffen werden jedoch teilweise metall-organische Additive eingesetzt, welche die Oxidationstemperatur des im DPF eingelagerten Ruß herabsetzen und somit eine Regeneration bereits bei niedrigeren Abgastemperaturen ermöglichen, gleichzeitig aber zur Veraschung des Partikelfilters führen [104] [109] [155]. Weitere aschebildende Bestandteile können in Form von metallischen Elementen durch Verunreinigungen beim Transport und durch die Lagerung in Kraftstoffe gelangen [111] [100].

Im Unterschied zu den oben erwähnten Untersuchungen zum Kraftstoffeinfluss zeigen andere Untersuchungen von Schlögl et al. [156], dass der Einfluss der Kraftstoffkomponenten auf die Partikelemissionen und daraus resultierende Ablagerungen bei heutigen Motoren und heutigen Diesekraftstoffen keine Rolle mehr spielt, bzw. nach Aussage anderer Untersuchungen im Vergleich zum Einfluss des Schmierstoffes unerheblich ist [116] [79], obwohl die durchschnittlich im Motor verbrauchte Ölmenge erfahrungsgemäß nur etwa 0,25 % des Kraftstoffs beträgt [31].

Trotz der uneinheitlichen Literaturaussagen zum Kraftstoffeinfluss bei mineralischen Kraftstoffen kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass heutige mineralische Diesekraftstoffe nach DIN EN 590 keinen nennenswerten Beitrag zu Ascheablagerungen mehr leisten. Im Gegensatz dazu können Pflanzenölkraftstoffe wesentlich höhere Konzentrationen an aschebildenden Elementen enthalten.

So berichten beispielsweise Richter et al. [149] nach Dauerlaufuntersuchungen mit Rapsölkraftstoff in sechs unterschiedlichen Motoren unabhängig vom Brennverfahren (Kammermotor oder Direkteinspritzer) und der Dauer des Prüflaufs von Verbrennungsrückständen auf den Auslassventilen. Die Analyse dieser Ablagerungen ergab, dass es sich bei den Belägen um anorganische Verbrennungsrückstände handelte (Phosphor und Calcium sowie Spuren von Kalium, Natrium, Silizium und Zink). Richter vermutet, dass diese Stoffe aus Düngemittelrückständen im Rapsöl stammen.

In Untersuchungen von Pudiel [138] wurden Brennraumrückstände in einem direkteinspritzenden Pflanzenölmotor nach 118,5-stündigem Betrieb mit Rapsöl mit einem Phosphorgehalt von ca. 85 mg/kg analysiert. Während des Betriebs hatten sich pulverförmige Ablagerungen an Kolbenboden, Zylinderkopf und dem Ventilteller des Auslassventils gebildet. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Analysenergebnisse der Rückstände [138]

Element	Einheit	Kolbenboden	Zylinderkopf	Auslassventil
P	g/kg	209	201	203
S	g/kg	0,94	0,12	0,23
Ca	g/kg	164	175	172
K	g/kg	74	65	94
Mg	g/kg	63	68	68
Fe	g/kg	22,3	25,9	12,9
Zn	g/kg	22	19	20
Cr	g/kg	3,1	2,8	0,9
Mn	g/kg	1,3	2,8	4,1
Al	g/kg	2,5	0,59	0,28

Da bei den Untersuchungen ein spezielles Schmieröl ohne phosphorhaltige Additive verwendet wurde, sind zumindest die Phosphorablagerungen eindeutig dem Kraftstoff zuzuordnen.

Im Zusammenhang mit der Ablagerungsbildung verschiedener Fettsäureester stellen Wörgetter et al. [194] einen Zusammenhang zwischen Jodzahl und Ablagerungsneigung fest. Demzufolge neigen Biokraftstoffe mit hoher Jodzahl zur Ablagerungsbildung auf Einspritzdüsen, Kolbenringen und in den Kolbenringnuten. Ähnliche Aussagen zum Einfluss der Jodzahl finden sich z. B. auch bei Remmele [147].

Schmieröl

Die Relevanz des Schmieröls in Bezug auf Ablagerungsbildung wird dadurch unterstrichen, dass spätestens seit dem zunehmenden Einsatz von Dieselpartikelfiltern die Anforderungen an die Schmierstoffe deutlich gestiegen sind. Die genauere Betrachtung der Ablagerungsbildung im Partikelfilter in Kapitel 2.2.3.2 verdeutlicht dies.

Ein Großteil des Schmieröls tritt über das Kolbenringpaket als wandanlagernder Film in den Brennraum ein, nur ein vergleichsweise kleiner Anteil über die Blow-By-Gase, einen eventuell vorhandenen Abgasturbolader und die Einlassventilschaftdichtung. Auf den letztgenannten Wegen hat das Schmieröl zunächst keinen direkten Wandkontakt, sondern tritt zerstäubt mit der Ansaugluft in den Brennraum. Diese Eintrittsform ist ähnlich der beim Ottomotor. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Dieselmotor ist hier grundsätzlich möglich. Der Zusammenhang zwischen Ablagerungsbildung und der über eine Oberfläche zugeführten Ölmenge kann als bewiesen gelten. Diesbezügliche Ergebnisse wurden z. B. von Schommers [158] und Starke et al. [166] [165] veröffentlicht.

Wie bei Kraftstoffen besteht auch bei Schmierstoffen ein Zielkonflikt dergestalt, dass aschebildende Additive im Schmieröl wichtige Schmier- und Reinigungsfunktionen übernehmen, bei der Verbrennung aber zu Rückständen führen.

Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Schmieröls auf die Ablagerungsbildung wird in der Literatur nicht einheitlich bewertet. Von Bitting et al. [14] und Starke [166] wird berichtet, dass eine Beeinflussung der Ablagerungsbildung über die Wahl der Ölsorte im praktischen Betrieb nicht möglich ist. Dem widersprechen z. B. Untersuchungen von Schommers [158] (Einfluss der unterschiedlichen Siedeverläufe von Ein- und Mehrbereichsölen), Leonhardt [102] (Einfluss des Gehalts an Viskositätsverbesserern). Daneshgari [31] sieht ebenfalls einen Einfluss der chemischen Zusammensetzung. Seiner Meinung nach muss bei der Beurteilung des Schmierstoffeinflusses auf die Ablagerungsbildung nach zwei Gesichtspunkten unterschieden werden:

- Einfluss der in den Brennraum/auf Oberflächen gelangenden Ölmenge
- Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Schmieröls

Bei Dieselmotoren mit Partikelfiltern spielen die Ascheemissionen des Motors eine wichtige Rolle für die Beladung des Filters. Diese Emissionen bestehen hauptsächlich aus Metalloxiden, Sulfaten und Phosphaten, welche ihren Ursprung in verschiedenen Elementen des Schmieröls haben. [185]

Der Gehalt an entsprechenden Elementen als Maß für den Anteil nicht brennbarer Bestandteile spiegelt sich im Sulfatascheanteil des Öls wieder. Direkten Einfluss auf den Sulfatascheanteil nehmen (metallische) Additive; deren Einsatzmöglichkeit wird somit bei einem Öl mit geringem Ascheanteil beschränkt. Diese Additive werden als Verschleißschutz und zur Vermeidung von Brennraumablagerungen eingesetzt. [111] Typische Bestandteile solcher Additive sind z. B. Calcium, Magnesium und Barium sowie Zinkdithiophosphat [170] [169].

2.2.2 Bildungsmechanismen von Ablagerungen

Für den nachfolgenden Überblick zu Mechanismen der Ablagerungsbildung wird stellvertretend zu ähnlichen Untersuchungen das sehr umfassende Modell von Lepperhoff et al. [106] vorgestellt. Das Modell wurde 1987 erstmalig präsentiert und 1993 ergänzt [103].

Ergebnisse aus weiteren Untersuchungen werden zusätzlich zu dem Modell präsentiert. Aufgrund des Veröffentlichungszeitpunkts und dem Ursprung des ursprünglichen Modells aus Untersuchungen an einem Ottomotor ist dort nur die Ablagerungsbildung im Brennraum beschrieben, Vorgänge im Abgasnachbehandlungssystem sind nicht abgebildet. Dennoch gelten die genannten Vorgänge teilweise auch im Abgassystem. In der Veröffentlichung von 1993 werden Abgaswärmetauscher mit behandelt.

Grundsätzlich lässt sich die in Abbildung 10 dargestellte Ablagerungsbildung in vier Hauptschritte unterteilen, die in den nachfolgenden Unterkapiteln im Detail betrachtet werden [103]:

- Entstehung von ablagerungsbildenden Komponenten
- Transport von ablagerungsbildenden Komponenten aus der gasförmigen Phase zur Wand
- Bildung von Ablagerungsschichten an der Wand/Anhaften an der Wand und Wachstum von Ablagerungen
- Abtrag von Ablagerungen von der Wand

Die genannten möglichen Reaktions- bzw. Bildungswege laufen nicht alle gleichzeitig ab. Vielmehr erfolgt die Ablagerungsbildung aus unterschiedlichen Ausgangsprodukten und an unterschiedlichen Orten nach unterschiedlichen Mechanismen.

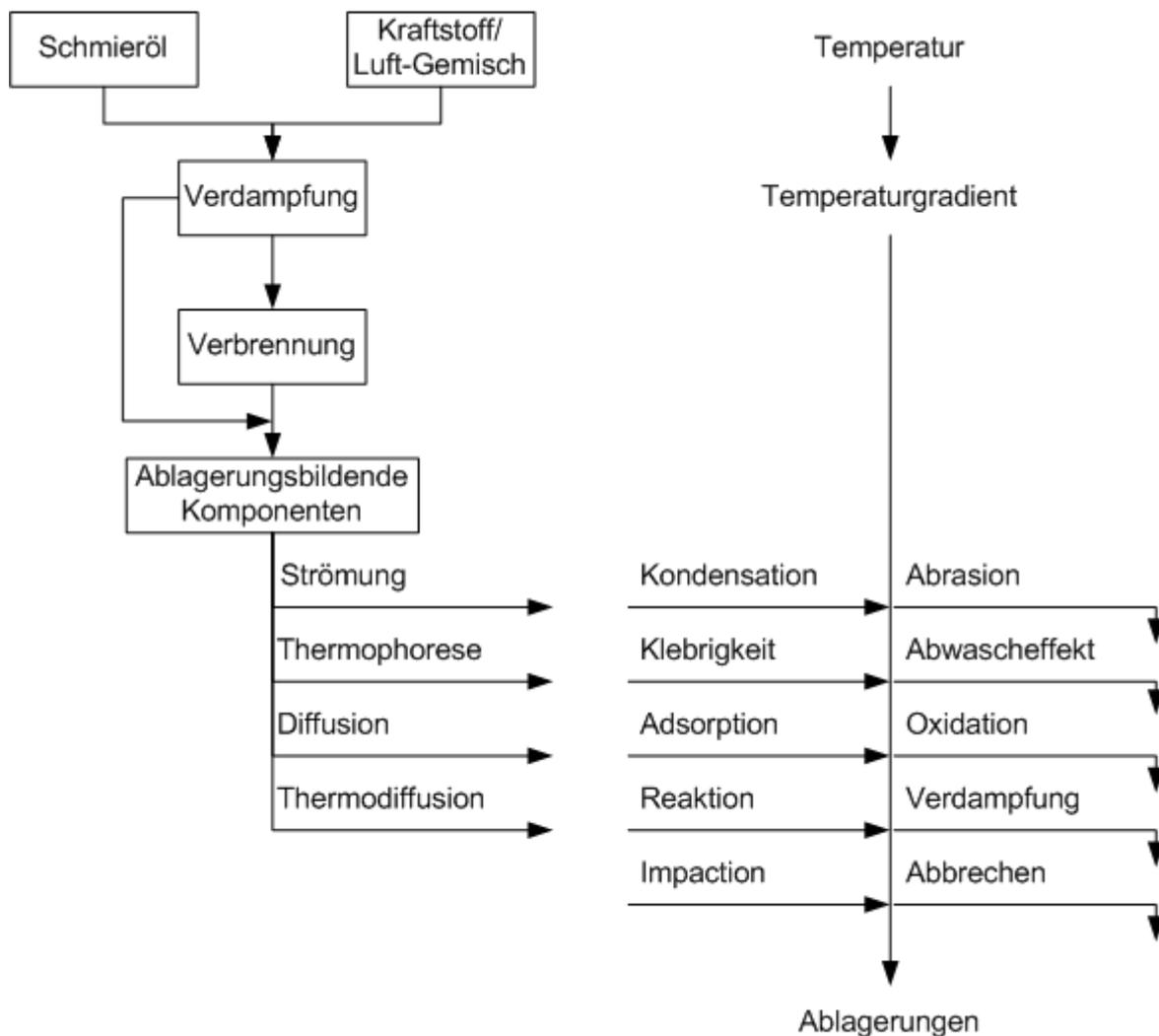


Abbildung 10: Modell der Ablagerungsbildung nach Lepperhoff (nachgebaut) [106]

Neben den damit beschriebenen Vorgängen im Brennraum kann – insbesondere beim Dieselmotor – davon ausgegangen werden, dass der überwiegende Teil der im Brennraum gebildeten ablagerungsfähigen Komponenten den Brennraum direkt über das Auslassventil verlässt, ohne sich zuvor an einer Oberfläche im Brennraum abzusetzen. Die Partikel, die sich im Abgasnachbehandlungssystem anlagern können, wurden in der Regel bereits im Brennraum gebildet. Eine weitere Bildung von ablagerungsfähigen Komponenten im Abgassystem ist bei Abgasnachbehandlungssystemen mit katalytisch beschichteten Trägermaterialien oder zusätzlicher Eindüsung eines Reduktionsmittels (z. B. SCR-Systeme oder DPF-Systeme mit HC- bzw. Brennerregeneration) grundsätzlich möglich.

Dagegen ist ein Abbau von bereits gebildeten Partikeln im Abgassystem üblich. So werden z. B. im DPF die im Brennraum generierten Rußpartikel gesammelt und während der Regenerationsphasen mit dem im Abgas vorhandenen Sauerstoff zu CO_2 oxidiert.

Bei katalytisch beschichteten Trägermaterialien kann zusätzlich zu rein mechanischen Ablagerungsvorgängen eine so genannte „Katalysatorvergiftung“ (Desaktivierung der katalytisch wirksamen Oberfläche) durch Schwefel oder Phosphor erfolgen.

2.2.2.1 Entstehung von ablagerungsbildenden Komponenten

Die Bildung von ablagerungsbildenden Komponenten erfolgt nach Lepperhoff [105] durch Verdampfung und eventuell anschließende Verbrennung von Kraftstoff und Schmieröl. Dabei befindet sich das Schmieröl teilweise bereits auf der Brennraumwand (Laufbuchse), teilweise wird es mit dem Kraftstoff in der Luft verbrannt (Blow-By, etc.). Aus diesen Reaktionen entstehen Radikale und Partikel [105] sowie Aschen, aus welchen sich verschiedene Ablagerungsarten bilden können. Ob diese bei der Verbrennung entstehenden ablagerungsbildenden Komponenten jedoch tatsächlich zu Brennraumablagerungen führen, hängt maßgeblich von den Transportmechanismen zur Brennraumwand ab (siehe Kapitel 2.2.2.2).

Basis vieler dieselmotorischer Ablagerungen ist Ruß, der auch als Trägermaterial für andere ablagerungsbildende Komponenten dient. Zur Bildung von Dieselruß existieren viele auch neuere Untersuchungen [74] [95], die sich meist sowohl mit der Ruß- als auch mit der NO_x -Bildung auseinandersetzen. Ein Großteil der im Brennraum gebildeten Rußmenge wird noch während der Verbrennung weiter oxidiert, eine vollständige Oxidation ist aufgrund des inhomogenen Gemischs im Brennraum jedoch nicht möglich. Die Angaben zum Verhältnis von Restruß im Abgas zur ursprünglich gebildeten Rußmenge sind sehr uneinheitlich, Henle [74] berichtet von einer Spannbreite in der Literatur von 0,1 bis 15 %. Im Gegensatz zu Rußpartikeln ist eine weitere Oxidation der bei der Verbrennung gebildeten Aschepartikel im Brennraum nicht möglich.

Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem entsprechen zunächst den Rohpartikelemissionen des Motors, allerdings erfolgt auch dort eine fast vollständige kontinuierliche oder zyklische Weiteroxidation des eingelagerten Rußes (im DPF) und der löslichen organischen Bestandteile (SOF) im Oxidationskatalysator [29]. Zurück bleiben Aschebestandteile aus der Verbrennung. Zusätzlich können weitere ablagerungsfähige Komponenten entstehen, beispielsweise bei der unerwünschten Oxidation von SO_2 zu SO_3 im Oxidationskatalysator.

2.2.2.2 Transport von ablagerungsbildenden Komponenten zur Wand

Der Transport von ablagerungsfähigen Komponenten zur Wand kann durch Gasströmung, Thermophorese, Diffusion sowie Thermodiffusion erfolgen. Welcher der genannten Mechanismen für die Bildung von Ablagerungen an einem Ort jeweils entscheidend ist, hängt stark von der Wandtemperatur, dem Temperaturgradienten zwischen Gas und Wand, der Strömungsgeschwindigkeit und von Konzentrationsunterschieden ab. [105]

Die auf der Bewegung von Materie aufgrund von Temperaturdifferenzen beruhenden Transportmechanismen führen zu einem negativen Zusammenhang zwischen Ablagerungsbildung und Wandtemperatur. Sobald die Wandtemperatur die Gastemperatur erreicht oder überschritten hat, findet kein Transport des Gases durch Thermophorese zur Wand und folglich auch keine Ablagerungsbildung mehr statt.

In Abbildung 11 ist dieser Zusammenhang zwischen Ablagerungsbildung und Wandtemperatur (beeinflusst durch die Kühlwassertemperatur) anhand zweier unterschiedlicher Gastemperaturen (140 °C und 180 °C) dargestellt. [103]

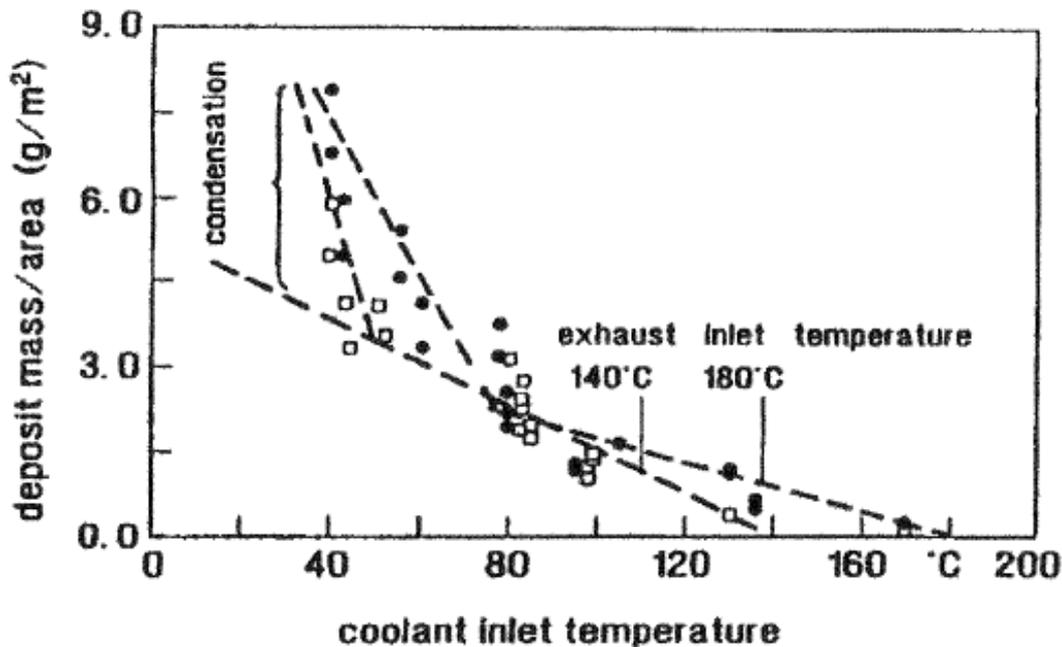


Abbildung 11: Einfluss der Kühlwassertemperatur auf die Ablagerungsbildung [103]

Die in anderen Untersuchungen beschriebene Abhängigkeit der Ablagerungsbildung von Bauteiltemperaturen [26] [30] [84] [123] zeigt ein gegensätzliches Verhalten (verstärkte Ablagerungsbildung bei hohen Oberflächentemperaturen). Dies ist dadurch zu erklären, dass bei der überwiegenden Anzahl von Arbeiten eine eindeutige Unterscheidung in Transport- oder Bildungsmechanismen nicht möglich ist, da lediglich die Auswirkungen unterschiedlicher Wandtemperaturen beobachtet, nicht jedoch die Ablagerungsvorgänge nach den Phasen des Lepperhoff-Modells getrennt untersucht wurden.

Zusätzlich zum Einfluss der Temperatur sind insbesondere im Brennraum oftmals auch Einflüsse der **Strömung** auf die Ablagerungsbildung zu finden. Neben der vom Kolben selbst verursachten Gasbewegung sind hier insbesondere die Einflüsse des Einlasskanaldralls und des Spritzbilds der Einspritzdüse zu berücksichtigen.

Die An- bzw. Einlagerung von ablagerungsbildenden Komponenten durch **Diffusion** erfolgt z. B. in Abgasnachbehandlungskomponenten. Beispiele dafür sind bei Czerwinski et al. [29] zu finden.

2.2.2.3 Bildung von Ablagerungsschichten

In seinem Modell stellt Lepperhoff einen 4-schichtigen Aufbau von Brennraumablagerungen vor. Andere Untersuchungen von Daly und Bannon [30] bestätigen das Modell grundsätzlich, sprechen aber nur von 2-schichtigen Ablagerungen. Allen Untersuchungen gemeinsam ist, dass die erste Ablagerungsschicht aus einem dünnen, klebrigen Film besteht. Sobald die Ablagerungen auf der Wand haften, können dort weitere chemische Reaktionen ablaufen (Pyrolyse, Polymerisation, etc.). Mit einem sehr ähnlichen Modell beschreiben Geskes et al. [58] den Ablagerungsvorgang von dieselmotorischem Ruß in AGR-Kühlern. Dieser ist in Abbildung 12 dargestellt.

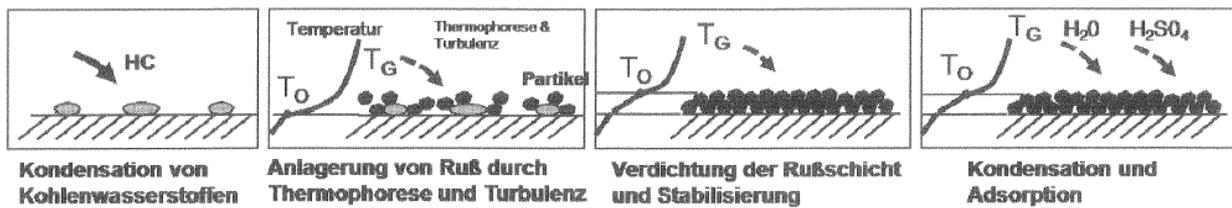


Abbildung 12: Modellvorstellung für das Ablagerungsverhalten von Ruß [58]

Analog zum Transport ablagerungsfähiger Komponenten zur Wand wird auch die Ablagerungsbildung auf der Wand von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst.

Daneshgari [31] teilt die Einflüsse der Bildung von Ablagerungsschichten in vier Hauptgruppen ein:

- Materialeinfluss
- Schmieröleinfluss
- Kraftstoffeinfluss
- Einfluss physikalischer Größen

Ein signifikanter Einfluss des Bauteilmaterials (bzw. seiner Oberflächeneigenschaften und Wärmeleitfähigkeiten) wird in verschiedenen Untersuchungen immer wieder vermutet [14] [131] [158], konnte aber bislang nicht sicher nachgewiesen werden (siehe dazu Kapitel 2.2.6 Minimierungsstrategien). Lediglich Papke [131] kommt nach Untersuchungen zur Ablagerungsbildung auf Dieselmotorkolben zu dem Schluss, dass Ablagerungen auf Eisen- und Goldoberflächen schneller als auf Aluminiumoberflächen wachsen.

Der Einfluss von **Kraftstoff** und **Schmieröl** ist – wenn auch unterschiedlich gewichtet – unbestritten. Einzelheiten dazu wurden bereits in Kapitel 2.2.1 besprochen.

Untersuchungen zum Einfluss **physikalischer Größen** beschäftigen sich vorwiegend mit der Oberflächentemperatur der von Ablagerungsbildung betroffenen Bauteile. Dabei sind die Aussagen, ob hohe oder niedrige Oberflächentemperaturen die Ablagerungsbildung begünstigen, uneinheitlich. Während eine Vielzahl von Autoren die Ansicht vertreten, dass niedrige Oberflächentemperaturen die Ablagerungsbildung begünstigen [25] [26] [27] [84] [121] [123] gibt es auch wenige gegenteilige Meinungen, beispielsweise von McGeehan et al. [117]. Generell besteht auch hier die bereits bei den Transportmechanismen beschriebene Schwierigkeit der Trennung von Transport- und Bildungsmechanismen.

Bei der Zusammensetzung von Ablagerungen ist dagegen allgemein anerkannt, dass diese abhängig von der Oberflächentemperatur ist. Je höher die Temperatur, desto größer die Dichte der Ablagerungen [121] sowie der Anteil an festen Bestandteilen, da sich insbesondere die Kohlenwasserstoffe mit steigender Temperatur verflüchtigen [103] [123]. Demzufolge muss die ursprünglich zur Wand transportierte Ablagerungsmenge (inklusive der flüchtigen Bestandteile) bei höherem Temperaturniveau größer sein.

Die sich im Laufe der Zeit zunehmend verflüchtigenden niedrig-siedenden Ablagerungsbestandteile sind in der nachfolgenden Abbildung 13 zu erkennen. Nach einem sehr schnellen Ablagerungsaufbau bleibt die Dicke der anfangs noch porösen Ablagerungsschicht im weiteren Verlauf nahezu konstant, während kontinuierlich weiter Material ab- (bzw. „ein-“)gelagert wird. [103]

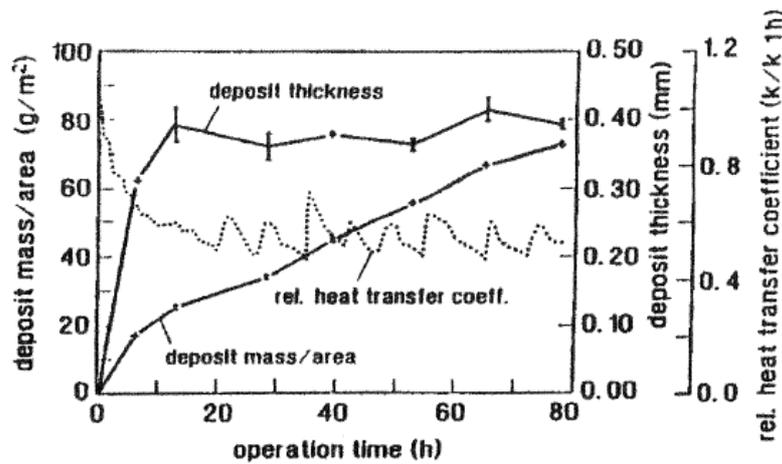


Abbildung 13: Verlauf von Ablagerungsmasse, Ablagerungsschichtdicke und rel. Wärmeleitfähigkeit während des Ablagerungsaufbaus [103]

Untersuchungen von Birkner [13] mit Rapsölkraftstoff zeigten, dass unabhängig von der genauen Zusammensetzung eines Rapsölkraftstoffs unvollständig verbrannte Kraftstoffreste im Brennraum zu Ablagerungen führen. Bei der Verdampfung von Pflanzenölen freigesetzte Lackbildner verbrennen bei niedrigen Brennraumtemperaturen (Schwach-/Teillast) nicht, sondern setzen sich als schwarze, schwer ablösbare Krusten auf Bauteilen im Brennraum (Einspritzdüsen, Kolben, Ventilen) ab. Bei Rapsöl können ab etwa 320 °C Oberflächentemperatur und schneller Aufheizung des Kraftstoffs Molekülumwandlungsprozesse einsetzen, die zu Verkokungen führen.

Abhängig von der Thermostabilität des eingesetzten Pflanzenöls (maßgeblich bestimmt vom Anteil mehrfach ungesättigter Fettsäuren) können diese Prozesse auch bereits bei niedrigeren Temperaturen ablaufen. So besteht bei thermisch weniger stabilen Ölen die Gefahr, dass insbesondere in heißen Bereichen des Kraftstoffsystems (Oberflächentemperaturen zwischen 270 bis 300 °C) eine sauerstoffunabhängige Hochtemperaturpolymerisation auftritt, welche harzartige Ablagerungen bildet. [1]

Weitere Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Ablagerungsbildung an den im Rahmen dieser Arbeit besonders relevanten Bauteilen finden sich in Kapitel 2.2.3.1.

2.2.2.4 Abtrag von Ablagerungen

Ablagerungen können während des Betriebs eines Motors nicht nur anwachsen, sie werden unter Umständen auch wieder abgetragen. Nach Lepperhoff und Houben [103] kann der Abtrag von Ablagerungen auf verschiedene Arten erfolgen. Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt diesen Überblick.

Tabelle 4: Mechanismen des Ablagerungsabbaus im Überblick, nach [103]

Mechanismus des Abtrags	Welche Ablagerungen?	Auslöser/Grund für Abtrag
Oxidation	Ruß, Kohlenwasserstoffe	Hohe Temperatur von Gas oder Ablagerung
Verdampfung	Flüchtige Bestandteile	Temperaturanstieg
Desorption	Gasförmige Bestandteile	Hauptsächlich Temperaturanstieg
Abrasion	Komplette Ablagerungen	Niedriges Haftvermögen, Relativbewegung von Bauteilen
Abbruch	Poröse Ablagerungen	Schubspannungen
Abwaschung		Flüssigkeitsstrom

Der für Oxidation, Verdampfung und Desorption verantwortliche Temperaturanstieg kann durch die Ablagerung selbst verursacht werden, da Ablagerungen grundsätzlich isolierend wirken und somit die Wärmeabfuhr reduziert wird. Bei Temperaturen oberhalb ca. 200 °C werden unverbrannte Kohlenwasserstoffe oxidiert, ab ca. 500 °C beginnen Ruß-Oxidationsvorgänge. [103] Im Abgasnachbehandlungssystem erfolgt mittels derartiger Ruß-Oxidationsvorgänge die Partikelfilterregeneration, hier wirkt sich eine Anhebung der Temperatur z. B. durch Erhöhung der Motorleistung oder Änderung des Einspritzzeitpunkts positiv aus.

Bei Abbruchvorgängen besteht die Möglichkeit, diese durch das Betriebsprofil zu beeinflussen. Abbrüche werden oft durch Temperatursprünge verursacht, wie sie beim Starten eines Motors oder bei großen Lastsprüngen auftreten [103]. Auch hier können jedoch zu häufige Startvorgänge zu einem starken Anstieg der Ablagerungsbildung führen, insbesondere in Bereichen, die nach dem Abstellen mit unverbranntem Kraftstoff in Berührung stehen [73].

Ein mechanischer Abbau von Ablagerungen durch Abrasion kann nur an zueinander bewegten Bauteilen erfolgen. Abrasionsvorgänge treten typischerweise im Feuerstegbereich auf, dort begrenzt das Kolbenlaufspiel die maximal mögliche Ablagerungsdicke. Weiterhin finden im Bereich der Ventilsitze Abrasionsvorgänge aufgrund der Relativbewegung zwischen Ventilteller und -sitz statt.

Abwaschungsvorgänge finden in Motoren und Abgasnachbehandlungssystem im Normalfall nicht statt.

Die genannten Abbaumechanismen können durch den Einsatz von Additiven verstärkt werden. Neben Additiven, welche eine Belagsbildung vermeiden sollen („keep clean Additive“), gibt es auch Reinigungsadditive, die bereits vorhandene Ablagerungen abbauen sollen („clean-up Additive“). Allerdings können zwischen Kraftstoff und Additiven starke Wechselwirkungen auftreten, so dass die resultierende Ablagerungsminderung sehr unterschiedlich ausfallen kann. [139]

Im Realbetrieb überlagern sich die vorgestellten Mechanismen teilweise. So berichten z. B. Daniel et al. [32] über Ergebnisse von Untersuchungen zur Ablagerungsbildung in Ottomotoren, bei denen festgestellt wurde, dass oberhalb von 400 °C eine Selbstreinigung von Ablagerungen an Zündkerzen zu beobachten ist. Weiter wird berichtet, dass hauptsächlich bei hohen Drehzahlen Ablagerungen auch wieder abplatzen. Es wird jedoch keine Aussage dazu gemacht, ob dies nur für Ablagerungen auf bewegten Bauteilen (Kolben, Ventile) zutrifft oder ob dieser Vorgang auch in ortsunveränderlichen Zonen (an den Brennraumwänden) zu beobachten ist.

Tree und Dec [178] stellte bei Untersuchungen zur Rußbeladung im Brennraum von direkt einspritzenden Dieselmotoren ab einer bestimmten Rußbeladung der Wand ebenfalls einen beginnenden kontinuierlichen Abbauprozess fest, der annähernd zu einem Gleichgewichtszustand der Beladung führt. Eine eindeutige Zuordnung eines bestimmten Abbaumechanismus war nicht möglich. Die Autoren nennen Oxidationsvorgänge aufgrund der ansteigenden Wandtemperaturen, Abbruch durch erhöhte Schubspannungen mit anschließender Oxidation oder verringerter Ablagerungstransport zur Wand aufgrund des verringerten Temperaturgradienten (siehe Kapitel 2.2.2.2) als mögliche Mechanismen. Nishiwaki und Hafnan [125] stellten in Untersuchungen zu thermischen Eigenschaften von Brennraumablagerungen ebenfalls fest, dass beim Betrieb mit schwefelarmen Dieseldieselkraftstoff nach sieben bis acht Betriebsstunden ein Gleichgewichtszustand erreicht war.

Abgebaute Ablagerungen werden teilweise im Brennraum oxidiert oder strömen durch das Auslassventil aus dem Brennraum in das Abgasrohr bzw. das Abgasnachbehandlungssystem. Theoretisch können daraus temporär erhöhte Partikelemissionen resultieren, in der Praxis wurde dieser Effekt jedoch nicht festgestellt [178]. Bei abrasiv oder durch Abbruch abgebauten Ablagerungen besteht jedoch die Gefahr, dass diese sich zwischen Kolben und Lauffbuchse oder im Bereich der Kolbenringe festsetzen und dadurch zu mechanischem Verschleiß der Lauffbuchse oder festsetzenden Kolbenringen führen können. Weiterhin können sich diese Ablagerungen auch im Bereich der Ventilsitze ablagern und dadurch zu einem nicht mehr dicht schließenden Ventil sowie beeinträchtigter Ventilkühlung führen. Über derartige Probleme wird z. B. von Kalghatgi und Price [85] berichtet.

2.2.3 Orte und Auswirkungen typischer Ablagerungen beim Dieselmotor

Beim Dieselmotor stehen heute insbesondere die Einspritzdüse sowie ein in der Regel vorhandener Partikelfilter im Fokus der Betrachtung von Ablagerungsbildung. Die Betrachtung der typischen Ablagerungen erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln nach Ort bzw. Bauteil gegliedert. Zum besseren Verständnis lassen sich die durch Ablagerungsbildung hervorgerufenen Effekte in drei Stufen untergliedern. Die folgende Tabelle 5 stellt diese drei Stufen inklusive der jeweiligen Beurteilungskriterien vor:

Tabelle 5: Gliederung von Ablagerungsbildung und daraus resultierenden Effekten

Stufe	Beschreibung des Vorgangs	Messgrößen zur Beschreibung
Stufe 1: Bildung der Ablagerung	Aufbau einer Ablagerungsschicht Einlagerung einer Ablagerungsmasse	Schichtdicke Beladungsmasse Beladungsfläche
Stufe 2: Primärer Effekt der Ablagerungsbildung	Einfluss der Ablagerung auf relevante Kenngrößen des Bauteils	Differenzdruck (DPF) Hydr. Durchfluss (ESD)
Stufe 3: Sekundärer Effekt der Ablagerungsbildung	Einfluss auf motorisches Verhalten (Betriebsverhalten, Emissionen, Dauerhaltbarkeit)	Leistung/Drehmoment Emissionen Kraftstoffverbrauch Verschleißrate

Eine Untersuchung der Verteilung von Ablagerungen verschiedener ablagerungsbildender Elemente über den gesamten Motor inklusive Abgasnachbehandlungssystem wurde von Grütering et al. [63] durchgeführt. In diesen Untersuchungen konnten 87 % aller schmierölstämmigen Ablagerungen verschiedenen Ablagerungsorten zugeordnet werden. Ein Großteil der Elemente

verbleibt im Schmieröl, etwa 25 % lagert sich im Abgassystem ab. Ablagerungen im Brennraum, dem AGR-System, dem Abgasturbolader und dem Schmierölfilter machen in Summe nur etwa 4 % aus.

Trotz der geringen Ablagerungsmenge im Brennraum ist dieser Ablagerungsort aufgrund seiner hohen Sensitivität und der noch nicht vollständig erforschten Mechanismen (viele, scheinbar zufällig ablaufende Vorgänge insbesondere an der Einspritzdüse) von sehr großer Bedeutung, wie das folgende Unterkapitel zeigt.

Generell führen Ablagerungen zu einem schlechteren Betriebs- und Emissionsverhalten eines Motors. Zusätzlich können sie zu einer mechanischen Schädigung bis hin zum Ausfall des Motors führen. Neben mechanischem Verschleiß – welcher ebenfalls durch Belagsbildung beschleunigt werden kann – sind Ablagerungen die Hauptursache für Motorschäden. Typische Folgen von Ablagerungen beim Dieselmotor sind: [31] [103]

- Verlackung der Zylinderlaufbuchsen
- Verschleiß der Honung („Bore polishing“)
- Anstieg der Kolbentemperatur, kann zur Verlackung von Schmieröl an der Kolbenunterseite führen
- Beeinträchtigung der Zerstäubung/Einspritzzeiten

2.2.3.1 Brennraum

Innerhalb des dieselmotorischen Brennraums herrschen bei einer Betrachtung der Ablagerungsmassen bzw. -mengen ähnliche Voraussetzungen wie bei der Betrachtung über den gesamten Motor. Die mit Abstand geringste Ablagerungsmenge findet sich an der Einspritzdüse wieder, gleichwohl haben die dort gebildeten Beläge den größten Einfluss auf das motorische Verhalten.

Am wenigsten kritisch sind Ablagerungen auf der Brennraumdecke (Zylinderkopf) und im Feuerstegbereich. Diese wirken grundsätzlich isolierend und führen zu einem Anstieg der Oberflächentemperatur. Weiterhin erhöht sich bei einer entsprechend dicken Ablagerungsschicht das Verdichtungsverhältnis, was zu einem Anstieg der Kompressionsendtemperatur führt. [105]

Durch den schlechteren Wärmeübergang kann es im Brennraum zu höheren Temperaturen und dadurch höheren NO_x-Emissionen kommen. Obwohl die Ablagerungsschichten oft nur wenige µm dick sind, reduziert sich die Wärmeleitfähigkeit der Wand dadurch um bis zu 40 %. [193]

Neben erhöhten NO_x-Emissionen rücken auch die durch Ablagerungen beeinflussten Partikelemissionen immer mehr in den Vordergrund. Weiterhin können Brennraumbeläge Ruß und unverbrannte Kohlenwasserstoffe aufnehmen und während des Ladungswechsels „an der Verbrennung vorbei“ ausstoßen. [2] [91]

Die Zusammensetzung von Brennraumablagerungen variiert in Abhängigkeit von Drehzahl und Last, die genauen Zusammenhänge sind jedoch noch nicht bekannt. Gastemperatur, die Verteilung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Brennraum, sowie Oberflächentemperaturen beeinflussen das Verhältnis von löslichen und unlöslichen Ablagerungsbestandteilen. Bei hoher Last oder Drehzahl und daraus resultierenden hohen Gastemperaturen lassen sich Ablagerungen teilweise wieder durch Oxidation abbauen. [163]

Die Analyse der Zusammensetzung der Brennraumrückstände in einem direkteinspritzenden Pflanzenölmotor nach 118,5-stündigem Betrieb mit Rapsöl mit einem Phosphorgehalt von ca. 85 mg/kg von Pudol [138] zeigte keine Abhängigkeit vom Ort der Beladung. Betrachtet wurden dabei Ablagerungen auf Kolbenboden, Zylinderkopf und Auslassventil. Die genaue chemische Analyse der Ablagerungen ist in Tabelle 3 in Kapitel 2.2.1 dargestellt.

Nach der allgemeinen Betrachtung des gesamten Brennraums erfolgt anschließend eine Detailbetrachtung von Untersuchungsergebnissen zu Ablagerungsbildung an Ventilen, Kolben und Einspritzdüse.

Ventile

Die im Rahmen der „Experimentellen Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren“ von Richter et al. [148] untersuchten Dieselmotoren mit Direkteinspritzung zeigten beim Betrieb mit Rapsöl (Phosphorgehalt ca. 90 mg/kg) insbesondere auf den Auslassventiltellern große Mengen an anorganischen Verbrennungsrückständen (hauptsächlich Calcium und Phosphor), die nach Vermutung der Autoren aus dem Rapsöl stammen. Bei den Einlassventilen war zusätzlich die Ventiltulpe mit Ölkohleablagerungen belegt, an den Auslassventilen erfolgte dagegen Öllackbildung auf dem Ventilschaft, welche in einen Fall zu einem nicht mehr selbsttätig schließenden Ventil führte.

In den Untersuchungen von Maurer [113] wird von Ölkohle auf den Einlassventiltulpen bei einem Kraftstoffgemisch bestehend aus 25 % Rapsöl und 75 % Diesel berichtet. Bei höherem Rapsölanteil (50 %) bilden sich Ablagerungen zusätzlich an den Ventilschäften, hier besonders deutlich an den Auslassventilen. Diese können aufgrund ihrer Menge und Konsistenz („zähe Masse“) bereits zum Festklemmen der Auslassventile führen. Die Belagsbildung auf den brennraumseitigen Ventiltellern war im Gegensatz zu den Untersuchungen von Richter et al. unauffällig, was auf den wesentlich geringeren Phosphorgehalt der für die Kraftstoffmischungen verwendeten Rapsöle zurückzuführen sein dürfte (Phosphorgehalt zwischen 3 und 13 mg/kg).

Kolben

Bisherige Untersuchungen zur Belagsbildung am Dieselmotorkolben konzentrieren sich auf den Bereich des Feuerstegs und der Kolbenringe/-ringnuten. Auswirkungen von festsitzenden bzw. nicht mehr frei beweglichen und damit schlechter abdichtenden Kolbenringen sind

- Kaltstartprobleme aufgrund schlechterer Kompression
- Anstieg der Blow-By-Gasmenge
- Anstieg des Schmierölverbrauchs.

Im Extremfall können festsitzende Ringe brechen und Riefen/Kratzer in der Zylinderlaufbuchse verursachen. [117] [140] [153]

Die Belagsbildung auf Kolbenboden und in der Brennraummulde wird überwiegend in allgemeinen Untersuchungen zur Ablagerungsbildung auf Brennraumboberflächen mit betrachtet.

Die im Bereich von Feuersteg und Ringgruppe gebildeten Ablagerungen können grundsätzlich kraftstoff- oder schmierölstämmig sein, da diese Bereiche in stetigem Kontakt mit dem Schmieröl stehen und über die Blow-By-Gase unverbranntes Kraftstoff-Luft-Gemisch in das Kurbelhaus geblasen wird [153]. Untersuchungen von McGeeham et al. [116] und Covitch et al. [28] zeigen jedoch den überwiegenden Anteil schmierölstämmiger Komponenten.

Insbesondere durch hohe Schwefelkonzentrationen in Kraftstoff oder Schmieröl werden Oxidationsprodukte aus dem Motorenöl zu Harzen gewandelt, welche als Bindemittel für Ruß aus der Verbrennung dienen können. Dies kann in den Kolbenringnuten zum Festsetzen der Kolbenringe führen. [153] [131]

Covitch et al. [28] untersuchten die Ablagerungszusammensetzung an diesen Orten auch im Hinblick auf Aschebestandteile. Insbesondere im Feuerstegbereich und der ersten Ringnut waren vom Sulfataschegehalt des Schmieröls abhängige Ascheablagerungen zu finden. Die Koksablagerungen im Feuerstegbereich waren dagegen unabhängig vom Sulfataschegehalt.

Simulationsrechnungen von Ra et al. [140] beschäftigten sich intensiv mit den Strömungsverhältnissen in den Ringnuten und zeigen den Einfluss des Schmierölfilms sowie von Betriebsparametern (Einspritzzeitpunkt und -verlauf) auf die Rußverteilung. Diese ist im Bereich der Kolbenringe aufgrund der dort erhöhten Konzentration von unverbrannten Kohlenwasserstoffen deutlich höher als an übrigen Brennraumwänden/-oberflächen.

Sem [161] untersuchte den Einfluss von vier unterschiedlichen Schmierölen (zwei mineralische, ein teilsynthetisches, ein vollsynthetisches) auf die Ablagerungsbildung auf Kolben beim Betrieb eines direkteinspritzenden Dieselmotors mit Sojamethylester. Zwischen den einzelnen Ölen waren Unterschiede in den Ablagerungen am Kolbenhemd und in der ersten Ringnut zu erken-

menge trotz Ablagerungsbildung nahezu konstant bleibt. Die Kolbenböden der direkt einspritzenden Dieselmotoren, die von Richter et al. [148] über einen Zeitraum von 155 bis 255 Betriebsstunden mit Rapsölkraftstoff (Phosphorgehalt ca. 90 mg/kg) betrieben wurden, wiesen normale bis starke Ablagerungen von Ölkohle sowie teilweise anorganischen Verbrennungsrückständen auf.

Einspritzdüse

Ablagerungsbildung an Diesel-Einspritzdüsen ist je nach Einsatzgebiet des Verbrennungsmotors und des verwendeten Kraftstoffs bereits seit langer Zeit bekannt. In der Regel gilt, dass eine mit Ablagerungen belegte Einspritzdüse den eingespritzten Kraftstoff schlechter zerstäubt. Dies kann zu weiterer Ablagerungsbildung im Brennraum und zu erhöhtem Kraftstoffeintrag ins Schmieröl führen.

Verschiedene Untersuchungen berichten z. B. von massiven Verkokungserscheinungen an Einspritzdüsen in den USA zu Beginn der 90er Jahre. Ursache war damals eine aufgrund des gestiegenen Dieselmotorkraftstoffbedarfs sich rapide verschlechternde Kraftstoffqualität. Insbesondere die mangelnde Oxidationsstabilität des Kraftstoffs führte in Kombination mit Sauerstoff und hohen Oberflächentemperaturen zu Verharzungen im Bereich der Düsennadel. Auf den harzartigen Belägen konnten sich weitere Ablagerungen aufbauen. Durch Einsatz eines geeigneten Kraftstoff-Additivpakets konnten die Probleme bei den damals üblichen Zapfendüsen eliminiert werden. [50] [128] [162] [195]

Heute verwendete moderne Diesel-Einspritzdüsen sind aufgrund der zur Erfüllung aktueller Emissionsanforderungen notwendigen kleinen Spritzlöcher sowie deren strömungsoptimierter Gestaltung durch konische Spritzlochform und hydroerosive Verrundung deutlich anfälliger für Ablagerungsbildung als deren Vorgänger. Zusätzlich können die höheren Temperaturen aufgrund höherer Einspritzdrücke und gesteigener Mitteldrücke im Brennraum zu verstärkter Ablagerungsbildung führen. [21] [100] [54] [22] [62]

Aus diesem Grund sowie wegen der vermehrten Beimischung von Bio-Kraftstoffen zum mineralischen Dieselmotorkraftstoff rückte dieses Teilgebiet der Ablagerungsbildung in den letzten Jahren zunehmend wieder in den Vordergrund von Untersuchungen zur Ablagerungsbildung im Brennraum. Einige der nachfolgend vorgestellten Untersuchungen beschäftigen sich daher auch mit den Auswirkungen der Beimischung von FAME (Fettsäuremethylester) zum mineralischen Dieselmotorkraftstoff. Diese Beimischungen können grundsätzlich zu höheren Ablagerungen an Einspritzdüsen führen, allerdings sind die dafür verantwortlichen Mechanismen noch nicht ausreichend bekannt. Vermeintlich gleiche Kraftstoffchargen zeigen daher in den Untersuchungen oft ein völlig unterschiedliches Verhalten. [23]

Typische Auswirkungen von Ablagerungen an Einspritzdüsen sind beispielsweise bei Fortnagel [50], Graupner et al. [62], Olsen et al. [128] und Yonekawa [195] beschrieben. Die Autoren nennen schlechteres Laufverhalten, Kaltstartprobleme, Leistungsverlust, höhere Emissionen, höheren Kraftstoffverbrauch sowie lauterer Verbrennungsgeräusch als Folgen derartiger Ablagerungsbildung.

In den meisten Fällen tritt Ablagerungsbildung an mehreren Stellen der Einspritzdüse auf. Insbesondere bei Felduntersuchungen (z. B. „100-Traktoren-Demonstrationsprojekt“ in Deutschland [70]; „35-Traktoren-Projekt“ in Österreich [141]) wird in der Regel nur von Ablagerungen an der Einspritzdüse gesprochen, die zu Betriebsstörungen oder Schäden führten. Eine weitere Untersuchung der Einspritzdüsen wurde meist nicht durchgeführt.

Um die große Zahl der in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse zur Belagsbildung an der Einspritzdüse besser einordnen zu können, wird nachfolgend sofern möglich dennoch nach drei Bereichen der Belagsbildung unterschieden:

- im Düseninneren
- im Düsenloch
- außen auf der Düsenskuppe

Dabei konzentriert sich die Mehrzahl der Untersuchungen mit mineralischen Kraftstoffen auf die Belagsbildung im Düsenloch und die damit verbundene Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der Einspritzdüse. Eine Beschreibung von Ablagerungen außen auf der Düsenkuppe sowie deren Einfluss erfolgt wesentlich häufiger im Zusammenhang mit pflanzenölstämmigen Kraftstoffen. Die dadurch verursachten Effekte sind jedoch schwerer zu quantifizieren als die Veränderung der hydraulischen Eigenschaften.

Belagsbildung im Düseninneren

Ablagerungen im Düseninneren – speziell im Bereich der Düsennadelspitze bzw. des Nadel-sitzes – können zu undichten oder nachtropfenden Einspritzdüsen führen. Dies führt zu höheren CO- und THC-Emissionen, außerdem kann Ruß aus dem Brennraum in den Düsenkörper zurückgeblasen werden. [1] [148]

Ziejewski und Goettler [197] untersuchten verschiedene Einflussfaktoren auf die Belagsbildung an der Düsennadel in Einspritzdüsen beim Betrieb mit Sonnenblumenöl. Diese lackartigen Beläge können dazu führen, dass die Düsennadel im Düsenkörper klemmt und sich somit das Betriebs- und Emissionsverhalten des Motors drastisch verschlechtert.

Neben einem schwach positiven Effekt eines größeren Spiels in der Nadelführung erwies sich insbesondere der Temperaturverlauf nach dem Abstellen des Motors als entscheidend für die Belagsbildung. Insbesondere das schlagartige Abstellen eines unter hoher Last betriebenen heißen Motors begünstigt die Belagsbildung. Nach Möglichkeit sollte ein Motor daher vor dem Abstellen zunächst im Schwachlastbetrieb abkühlen.

Ullmann et al. [180] berichten von zunehmenden Problemen mit Belagsbildung im Common-Rail-Injektor durch metallhaltige Ablagerungen (hauptsächlich Natrium) und organischen Polymeren. Grundsätzlich sind Beläge in Düsenhaltern schon seit langer Zeit bekannt. Durch die stark gestiegenen Anforderungen an das dynamische Verhalten sowie die sehr viel engeren Fertigungstoleranzen gewinnen diese Beläge jedoch erst bei modernen CR-Injektoren stark an Bedeutung. Weiterhin wird vermutet, dass die in CR-Injektoren herrschenden hohen Drücke und Temperaturen die Ablagerungsbildung noch zusätzlich forcieren.

Belagsbildung in den Düsenlöchern

In Untersuchungen zum Einfluss von Kraftstoffadditiven auf Einspritzdüsenablagerungen stellen Leedham et al. fest, dass bei modernen Lochdüsen Ablagerungen in den Spritzlöchern zu einem verringerten hydraulischen Durchfluss und damit zu Einbußen im Drehmoment sowie in der Folge zu höheren Abgastemperaturen und stärkerem Rußausstoß führen [100]. Die Verstopfung einzelner Düsenlöcher kann weiter dazu führen, dass durch die verbleibenden Düsenlöcher längere Einspritzstrahlen austreten, welche zu einer thermischen Überlastung des Kolbenbodens führen können. Im Extremfall kann dies zu einem Loch im Kolbenboden führen [139].

Nach Argueyrolles et al. [4] sind die drei wichtigsten Einflussfaktoren auf Düsenverkokungen:

- Kraftstoffzusammensetzung
- Einspritzdüsentemperatur (als Grenzwert werden 300 °C genannt, bei höheren Temperaturen steigt das Verkokungsrisiko sehr stark an)
- Düsenlochgeometrie

Die nachfolgend vorgestellten Literaturstellen sind in diese drei Einflussfaktoren gruppiert.

Untersuchungen zur Belagsbildung in den Einspritzdüsen werden bei mineralischen **Kraftstoffen** in der Regel durch Dotierung mit kraftstofflöslichem Zink-Salz durchgeführt. Relevante Arbeiten wurden in den letzten Jahren von Caprotti et al. [21], Leedham et al. [100] und Tang et al. [171] durchgeführt. Als Indikatoren für den Verkokungsgrad werden bei diesen Untersuchungen meist die Änderung von Nenn-Drehmoment bzw. -Leistung oder Kraftstoffmassenstrom über der Versuchszeit ausgewertet. Abbildung 17 zeigt den typischen Verlauf dieser Größen.

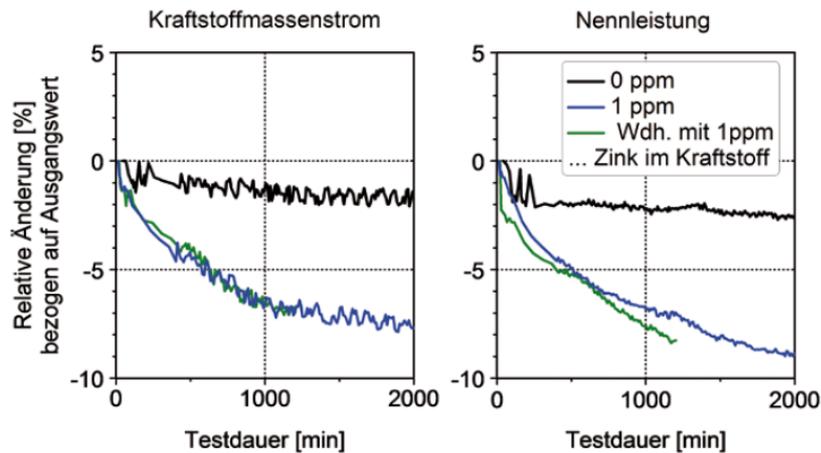


Abbildung 17: Relative Änderung von Kraftstoffmassenstrom und Motornennleistung aufgrund von Belägen in den Einspritzlöchern. [171]

Die Ergebnisse von Caprotti et al. zeigen, dass sich insbesondere bei hochdotierten Kraftstoffen bereits nach kurzer Versuchsdauer ein Sättigungseffekt einstellt. Dieser ist bei dem niedriger dotierten Kraftstoff auch nach wesentlich längerer Versuchsdauer und vergleichbarer Beeinflussung des motorischen Verhaltens nicht zu erkennen. Weiterhin sind auch bei diesen Untersuchungen analog zur Arbeit von Hage [67] Abplatzvorgänge erkennbar. Die Analyse der in obigem Versuch gebildeten Ablagerungen zeigt eine einheitliche, von der Zn-Konzentration oder der Versuchsdauer unabhängige Struktur. Die Untersuchung derartiger Ablagerungsbildungsmechanismen durch beschleunigte Versuche mit hochdotierten Kraftstoffen ist daher möglich.

Alternativ zur Erfassung der Änderung von Nennleistung bzw. -drehmoment oder Kraftstoffmassenstrom bei konstanten Einspritzparametern untersuchten Caprotti et al. [22] nach dem von Graupner et al. [62] vorgestellten Verfahren die Auswirkungen von Düsenverkokung auf Abgastrübung und Drehmoment. Dabei wird die Einspritzdauer in einem Vollastpunkt so lange variiert, bis eine definierte mechanische Leistung erreicht ist. Ein Vergleich der tatsächlich eingespritzten Kraftstoffmenge mit der für die gewählte Einspritzdauer von der Motorelektronik berechneten Menge lässt auf den Verkokungsgrad der Einspritzdüsen schließen. Abbildung 18 zeigt den Einfluss der Düsenverkokung auf die Abgastrübung.

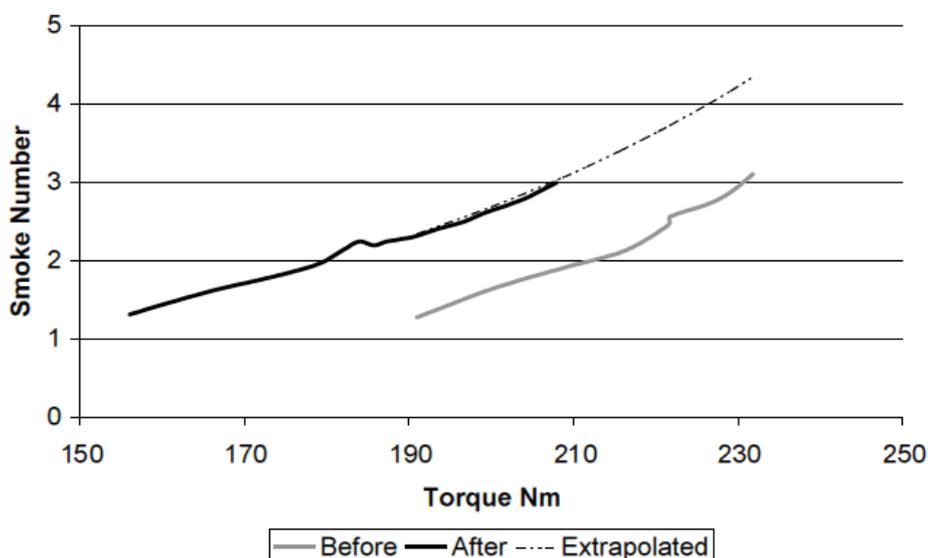


Abbildung 18: Vergleich der Rußzahl von neuen („Before“) und beladenen („After“) Einspritzdüsen [22]

Die Untersuchungen zeigen, dass der Eintrag von Zink in die Einspritzdüsen unbedingt vermieden werden muss. Der Eintrag kann sowohl über das Schmieröl (Kraftstoffgeschmierte Einspritzpumpen sowie rückströmende Verbrennungsgase) als auch über den Kraftstoff (Verunreinigungen während Transport und Lagerung, Austrag aus zinkhaltigen Bauteilen im Kraftstoffsystem) erfolgen. Heutige mineralische Dieselmotorkraftstoffe enthalten in der Regel zunächst kein Zink mehr, offen bleibt jedoch die Frage, inwieweit andere Metalle, wie sie z. B. in Biokraftstoffen vorkommen, die Ablagerungsbildung in Einspritzdüsen beschleunigen können.

In weiteren Untersuchungen von Caprotti et al. zum Einfluss von RME auf aktuelle und zukünftige Einspritzsysteme [23] wurden Kraftstoffverbrauch und Abgastemperatur als Indikatoren für den Wirkungsgrad der Verbrennung gewählt. Dabei führte beispielsweise eine um 10 % verringerte Einspritzmenge zu ca. 12 % weniger Drehmoment, jedoch nur zu einer um 8 % geringeren Abgastemperatur. Dies bedeutet, dass die Verringerung des maximalen Drehmoments nicht nur aus einer geringeren eingespritzten Kraftstoffmenge resultiert, sondern dass die Beladung der Einspritzdüse zusätzlich den Wirkungsgrad der Verbrennung verschlechtert. Ob dies jedoch primär durch eine schlechtere Zerstäubung des eingespritzten Kraftstoffs oder durch eine Verschiebung des Einspritzverlaufs verursacht wird, geht aus der Veröffentlichung nicht hervor.

In Dauerlaufuntersuchungen zum Langzeitverhalten eines 1-Zylinder-DI-Motors beim Betrieb mit unterschiedlichen Fett-Methylesterkraftstoffen beobachteten Wörgetter et al. [194] eine spritzlochindividuelle Reduzierung des jeweiligen Einspritzstrahls, welche nicht allein auf die außen auf der Kuppe sichtbaren Ablagerungen zurückzuführen ist. Mit Ausnahmen von Soja-Methyl-Ester war bei allen mit Fett-Methylesterkraftstoffen betriebenen Einspritzdüsen die eingespritzte Kraftstoffmenge pro Hub geringer als im Ausgangszustand bzw. als mit Dieselmotorkraftstoff.

Aus den in den 90er Jahren in den USA durchgeführten Untersuchungen zur Einspritzdüsenverkokung stammen erste Hinweise auf eine **Temperaturabhängigkeit** der Ablagerungsbildung. Im damals üblichen OM616-Test waren bei hohen Drehzahlen deutlich stärkere Verkokungen feststellbar als bei niedrigen Drehzahlen. Messungen zeigen, dass die Temperatur an der Einspritzdüse in erster Linie drehzahlabhängig ist, der Einfluss der Last (im Diagramm dargestellt als Abgastemperatur) ist geringer (siehe Abbildung 19). [162]

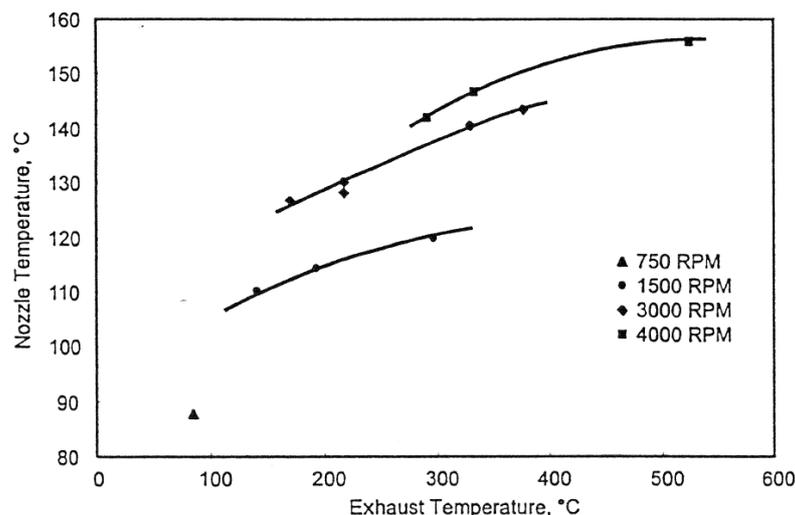


Abbildung 19: Einfluss von Drehzahl und Last auf die Einspritzdüsentemperatur [162]

Der negative Einfluss höherer Düsentemperaturen – auch mit verursacht durch die stark gestiegenen Einspritzdrücke – wird in aktuellen Untersuchungen z. B. von Tang et al. [171] sowie Caprotti et al. [22] bestätigt. In ihrer Übersicht über verschiedene Testverfahren zur Belagsbildung an Einspritzdüsen weisen auch Sengers und Olsen [162] auf die Temperatur als wichtige Einflussgröße auf die Belagsbildung hin.

Neben dem absoluten Temperaturniveau ist dabei auch die Konstanz der Temperatur von Bedeutung. So berichtet Hage [67], dass bei verschiedenen Prüfläufen insbesondere während der Startvorgänge Abplatzungen zu beobachten waren, was auf Wärmespannungen in den Belägen aufgrund hoher Temperaturgradienten während der ersten Verbrennungstakte zurückgeführt wird.

Hawthorne und Andre [73] sehen einen Zusammenhang zwischen der Ablagerungsbildung und dem Temperaturanstieg in der Einspritzdüse nach Abstellen des Motors, welcher vom Lastprofil des vorangegangenen Betriebs abhängig ist. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Ziejewski und Goettler [197] vorgestellt (siehe Belagsbildung im Düseninneren).

Dem speziellen Phänomen des Einflusses der Einspritzdüsenlochgeometrie und den daraus resultierenden **Strömungsverhältnissen** in der Einspritzdüse widmeten sich Argueyrolles et al. [4] In deren Untersuchungen wurde anhand von motorischen Versuchen, Messreihen auf einem Einspritzprüfstand und mit Hilfe von CFD-Berechnungen der Einfluss von Konizität und hydroerosiver Verrundung der Spritzlöcher auf die Verkokungsneigung untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass aufgrund fehlender Konizität und/oder Verrundung kavitierende Einspritzdüsen deutlich robuster gegenüber Ablagerungen in den Spritzlöchern sind als die entsprechend strömungsoptimierten Ausführungen.

In den Untersuchungen von Tang et al. [171] konnte durch Verzicht auf die hydroerosive Verrundung der Düsenlöcher die Minderung der Vollastleistung in einem 34-Betriebsstunden-Nennlastzyklus von 6 % auf 1 % verringert werden.

Neben den exemplarisch zitierten Untersuchungen zeigen auch sämtliche weiteren diesbezüglich durchgeführten Untersuchungen, dass unter dem Aspekt der Robustheit gegenüber Beladung Düsen zu bevorzugen sind, welche weder eine hydroerosive Verrundung des Spritzlocheintritts noch eine konische Form des Spritzlochs aufweisen. In Untersuchungen von Caprotti et al. [23] zeigte eine strömungsoptimierte Einspritzdüse deutliche Vorteile bei Partikel- und CO-Emissionen sowie Kraftstoffverbrauch, war jedoch um ein Vielfaches anfälliger für Belagsbildung.

In einer ähnlichen Versuchsreihe der selben Autoren [22] wird die Sensitivität gegenüber Ablagerungen von Serieneinspritzdüsen für Euro-4-Motoren mit den zukünftig für Euro-5-Applikationen erforderlichen Einspritzdüsen verglichen. Die Abbildung 20 zeigt die aufgrund der strömungsoptimierten Gestaltung der Spritzlöcher deutlich gestiegene Empfindlichkeit der Euro-5-Einspritzdüsen („Experimental Future Injectors“).

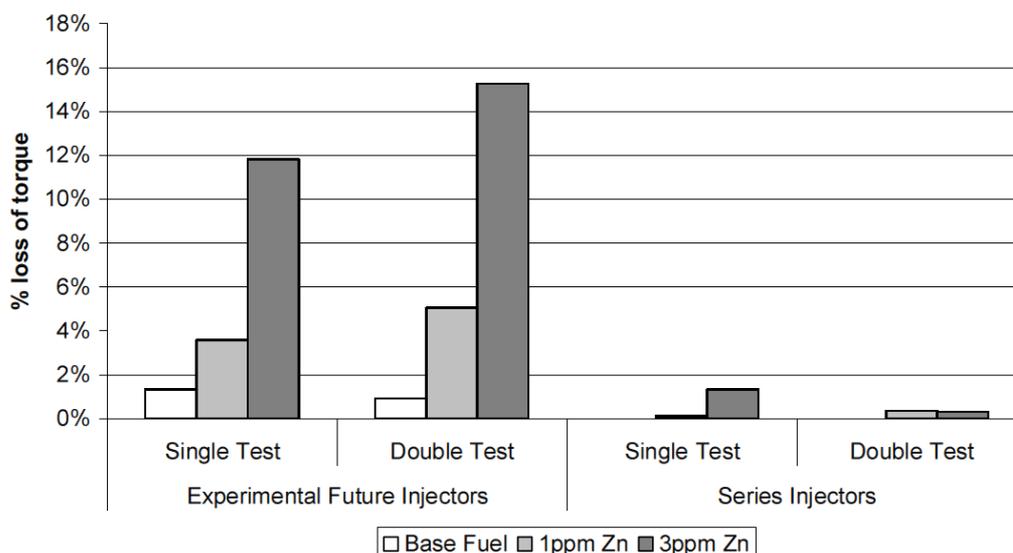


Abbildung 20: Vergleich der Sensitivität zweier Einspritzdüsen gegenüber Ablagerungen [22]

Die aufgrund der fortschreitenden Emissionsgesetzgebung erforderliche Güte der Kraftstoffzerstäubung ist jedoch ohne diese Maßnahmen nicht mehr darstellbar. Die Düsenauslegung ist daher immer ein Kompromiss aus günstigen Emissionswerten und einer ausreichenden Langzeitstabilität. [22] [62]

Neben der Form der einzelnen Spritzlöcher sind bei schräger Einbaulage einer Einspritzdüse im Brennraum auch Unterschiede aus den daraus resultierenden unterschiedlichen Höhenwinkeln der einzelnen Spritzlöcher nicht auszuschließen. Diesbezügliche Untersuchungen sind jedoch nicht bekannt.

Belagsbildung auf der Düsenkuppe

Ablagerungen auf der Düsenkuppe können ebenfalls zu einer Verengung der Spritzlochquerschnitte und damit einer Durchflussreduzierung führen. Zudem beeinträchtigen sie die Gemischbildung im Brennraum [100]. Eine Beschreibung eines möglichen Mechanismus der Belagsbildung auf der Düsenkuppe findet sich bei Caprotti et al. [24] Danach tritt nach Beendigung des Einspritzvorgangs der in den Düsenlöchern und eventuell im Sackloch verbliebene Kraftstoff teilweise aus und bildet auf der Düsenkuppe einen dünnen Kraftstofffilm. Niedrigsiedende Komponenten verdampfen aus diesem Film, die verbleibenden Bestandteile zersetzen sich thermisch und bilden Ablagerungen.

Untersuchungen von Ullmann und Winter [181] zeigen, dass bei mineralischen Kraftstoffen in modernen Einspritzsystemen die Zusammensetzung von Düsenkuppenbelägen vom Einspritzsystem des Motors abhängig ist. Bei Common-Rail-Systemen bestehen die Ablagerungen überwiegend aus Ruß, bei Pumpe-Düse-Systemen dagegen aus Asche (vermutlich aus dem Schmieröl). Weiterhin korreliert eine starke Belagsbildung außen auf der Düse nicht zwingend mit einer entsprechenden Reduzierung des hydraulischen Durchflusses.

Wörgetter et al. [194] stellten in ihren Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Pflanzen- und Tierfettmethylester bei einem Teil der Kraftstoffe einen bis zu 7,2 %igen Leistungsverlust am Ende eines Dauertests über 256 Betriebsstunden fest. Dieser konnte nur teilweise mit einem reduzierten hydraulischen Durchfluss der Einspritzdüsen erklärt werden. Es wird daher vermutet, dass zusätzlich zur gemessenen Durchflussreduzierung und den Ablagerungen außen auf der Düsenkuppe weitere Effekte die Kraftstoffzerstäubung (und damit die Verbrennung) negativ beeinflussen. Einflüsse auf die Strahlausbreitung waren insbesondere zu Beginn der Nadelöffnungsphase zu erkennen. Wie in anderen Veröffentlichungen beschrieben, wird gerade in dieser Zeit die vorgemischte Verbrennung festgelegt. Bei voll geöffneter Nadel sind nur noch leichte Unterschiede im Sprayverhalten zwischen den einzelnen Düsen erkennbar gewesen.

Vellguth [184] berichtet von Ablagerungen auf der Düsenkuppe einer 4-Loch-Einspritzdüse nach 50 Betriebsstunden mit vollraffiniertem Rapsölkraftstoff. Die rund um die Spritzlöcher „gewachsenen“ Rückstände bestehen aus unverbranntem bzw. nur teilweise verbranntem Kraftstoff. Durch die Ablagerungen verschlechtert sich das Strahlbild der Einspritzdüse, was in einer schlechteren Verbrennung und verstärkter Ablagerungsbildung resultiert.

Bei den von Richter et al. [148] durchgeführten Untersuchungen mit Rapsölkraftstoff mit 90 mg/kg Phosphor sind ebenfalls deutlich stärkere Ablagerungen an den Einspritzdüsen der direkteinspritzenden Motoren aufgetreten als beim Betrieb mit Dieselmotoren. Teilweise bildeten sich rund um die Spritzlöcher bereits „Ablagerungstrompeten“, die bereits mit den Ölkohleablagerungen am Zylinderkopf verwachsen waren.

Maurer [113] bewertet bei der Auswertung der Belagsbildung auf den Einspritzdüsen aus den Prüfläufen über 300 Betriebsstunden mit verschiedenen Rapsöl-Diesel-Mischungen ebenfalls ausschließlich die außen auf der Düsenkuppe gebildeten Beläge. Diese wurden anhand der abgelagerten Masse sowie deren Ascheanteil quantifiziert. Auffällig ist dabei, dass bei einer Verdoppelung des Rapsölanteils von 25 % auf 50 % die Gesamtmasse um ca. 50 % zugenom-

men hat, der Ascheanteil an der Ablagerung jedoch von 40 % auf 26 % gesunken ist. Eine optische Prüfung des Spritzbilds ergab „ein als mäßig einzustufendes Spritzbild“.

2.2.3.2 Abgasnachbehandlungssystem (Partikelfilter)

Die aus der Verbrennung von Kraftstoff und Schmieröl gebildeten Rußpartikel und Aschen werden zum Großteil über den Abgaskanal aus dem Brennraum ausgetragen. In einem dem Motor nachgeschalteten Partikelfilter werden diese Bestandteile je nach Filterart (offener oder geschlossener Partikelfilter) teilweise bzw. nahezu vollständig aufgefangen. Obwohl die dabei im Vergleich zum Brennraum gesammelte Ablagerungsmenge wesentlich größer ist, treten Funktionsstörungen erst bei vergleichsweise hohen Beladungen auf. [111] [169] [170]

In den Partikelfilter eingetragener Ruß wird zyklisch oder kontinuierlich oxidiert und auf diesem Weg wieder aus dem Partikelfilter ausgetragen. Durch die eingelagerten Aschen erfolgt hingegen ein kontinuierlicher, nicht regenerierbarer Aufbau von Ablagerungen.

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt, spielen bei aktuellen mineralischen Kraftstoffen die kraftstoffstämmigen Aschebestandteile bei der DPF-Beladung praktisch keine Rolle. Anders stellt sich die Situation bei Rapsölkraftstoffen dar, hier können nennenswerte Anteile an aschebildenden Substanzen im Kraftstoff vorliegen. Allerdings existieren nur wenige Untersuchungen zum Einsatz von Partikelfiltern mit Rapsölkraftstoffen. Aus diesem Grund konzentriert sich die Literaturstudie auf die Auswirkungen entsprechender bzw. ähnlicher Schmierölbestandteile. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse auf die Auswirkungen bestimmter Bestandteile in Rapsölkraftstoffen übertragbar sind.

Der Zusammenhang zwischen Schmierölzusammensetzung und Aschebildung war und ist Gegenstand vieler Untersuchungen speziell im Zusammenhang mit dem Einsatz von Dieselpartikelfiltern. [8] [64] [111] [169] [170] Oft wurde dabei auf beschleunigte Versuche zurückgegriffen, z. B. durch künstlich erhöhten Schmierölverbrauch. Typische Verfahren zur Beschleunigung sind:

- Beimischung von Schmieröl zum Dieselpartikelfilter [8] [170]
- Schmieröleindüsung in den Einlasskanal [169]

Die nachfolgende Literaturübersicht beschränkt sich auf keramische Partikelfilter, da alternative Filterausführungen (Sintermetalle, Wickelfilter, Schäume) in der Praxis noch selten zur Anwendung kommen.

In einer Veröffentlichung von Massoudi [112] werden die beiden gebräuchlichen Keramik-DPF-Ausführungen (Cordierit, SiC) hinsichtlich ihrer Druckverlustcharakteristika verglichen. Beide Filter zeigen dabei sowohl im unbeladenen als auch im beladenen Zustand vergleichbare Anteile der zum Druckverlust beitragenden vier Faktoren:

- Gasströmung durch die Kanalwände
- Gasströmung durch einen (Ruß-)Filterkuchen
- Reibung der Gasströmung entlang der Kanalwand
- Verdichtung/Entspannung der Gasströmung am Ein-/Austritt des DPF

Eine Unterscheidung zwischen den beiden Keramik-DPF-Ausführungen ist daher nicht erforderlich.

Die Literaturaussagen zum Einfluss von **Schmierölzusammensetzung** und -verbrauch auf das Beladungsverhalten des DPF sind widersprüchlich, lassen sich aber in Gruppen zusammenfassen.

In einem Großteil der Untersuchungen wird von einem direkten Zusammenhang zwischen der Aschebeladung und der Schmierölzusammensetzung bzw. dem Schmierölverbrauch berichtet. Gärtner et al. [64] zeigen anhand von Felduntersuchungen mit Nutzfahrzeugen den grundsätzlich linearen Zusammenhang zwischen Aschebeladung des Partikelfilters und Schmierölverbrauch bzw. Sulfataschegehalt des Schmieröls auf. In beiden Fällen wird von einem linearen

Zusammenhang berichtet. Zu dem gleichen Ergebnis kommen Manni et al. [110] in Untersuchungen mit acht verschiedenen Motorölzusammensetzungen.

Sutton et al. [169] stellten bei Untersuchungen an einem 6-Zylinder-Dieselmotor mit CRT-DPF in einem Langzeittest über 1118 Betriebsstunden ebenfalls einen linearen Zusammenhang zwischen Schmierölverbrauch und Massenzunahme des DPF fest. Darüber hinaus berichten Sutton et al. von einer daraus resultierenden Zunahme des Gegendrucks, die vom Gesamttrend ebenfalls linear steigend war, allerdings von wesentlich größeren Schwankungen überlagert wurde, wie Abbildung 21 zeigt. Eine Aussage über den Verlauf des Schmierölverbrauchs über der Testlaufzeit wurde nicht gemacht. Ebenso wurde der während der ersten 70 Betriebsstunden des DPF aufgetretene Druckabfall nicht näher untersucht.

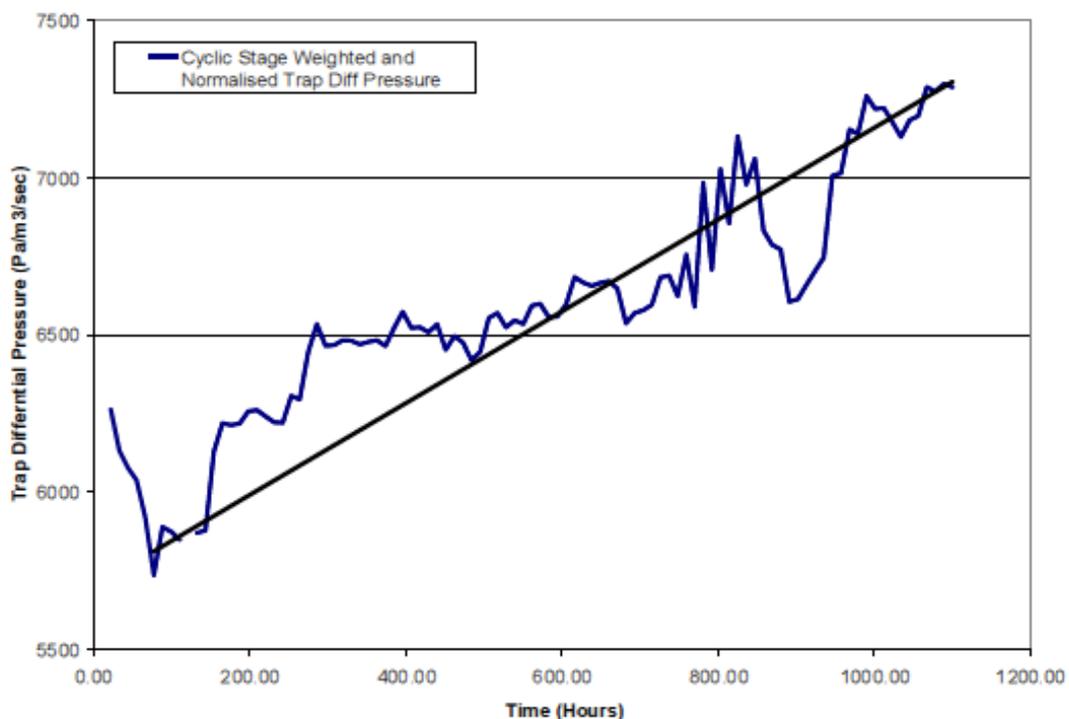


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Abgasgegendruck (normalisiert) und Versuchsdauer [169]

In einer anderen Untersuchung mit weiteren vier Schmierölen und einem alternativen DPF-System von Manni et al. [111] wurde der Zusammenhang zwischen dem Sulfataschegehalt des Schmieröls und der Massenzunahme des DPF bestätigt, allerdings konnte dabei kein linearer Zusammenhang mit der Massenzunahme mehr festgestellt werden. Die Autoren ermittelten außerdem einen ebenfalls nichtlinearen Zusammenhang 2. Ordnung zwischen der Massenzunahme des DPF und dem Anstieg des Abgasgegendrucks. In Kombination mit dem Zusammenhang zwischen DPF-Beladung und Sulfataschegehalt ergibt sich daraus ein linearer Gesamtzusammenhang zwischen Abgasgegendruck und Sulfataschegehalt.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Takeuchi et al. [170]. Die Autoren konnten bei DPF-Beladungsuntersuchungen mit neun unterschiedlichen Schmierölen keinen Zusammenhang zwischen dem Sulfataschegehalt des Schmieröls und der daraus resultierenden DPF-Beladungsmasse erkennen. Dennoch korrelierte der resultierende Gegendruck des DPF mit dem Sulfataschegehalt des Schmieröls.

Im Gegensatz zu den bislang vorgestellten Untersuchungen, bei denen eine Aschebeladung grundsätzlich zu einem Anstieg des Gegendrucks vor DPF führte, wird in Untersuchungen von Konstandopoulos et al. [93] berichtet, dass eine geringe Aschebeladung den vom DPF verur-

sachten Abgasgegendruck sogar verringern kann (siehe Abbildung 22). Dies ist der Fall, wenn sich eine dünne Ascheschicht als Trennschicht zwischen der Filterwand und der Rußschicht bildet, welche das Eindringen von Rußpartikeln in die Filterwand verhindert. Dadurch bleibt die Porosität der Wand erhalten, folglich kann das Gas leichter durch die Wand strömen.

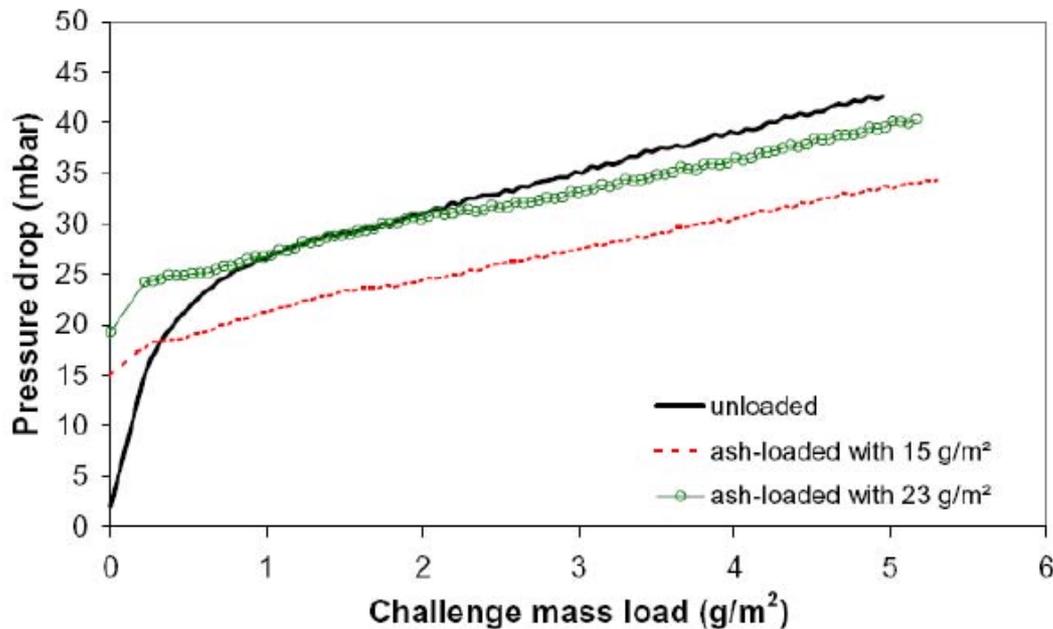


Abbildung 22: Abgasgegendruck des DPF in Abhängigkeit der Beladung [93]

Hoshino et al. [78] konnten keinen Zusammenhang zwischen dem Sulfataschegehalt des Schmieröls bzw. der Aschebeladung des Partikelfilters und dem Abgasgegendruck finden.

Die Gründe für diese widersprüchlichen Aussagen sind vielfältig. So können sich Ablagerungen abhängig von der Gestaltung des Abgassystems auch an anderen Stellen (z. B. der AGR-Leitung oder in einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator) bilden und so zu Unterschieden in der Verteilung von Sulfaten, Phosphaten und Oxiden führen [110].

Weiterhin bildet nach Aussage von vielen Autoren (Watson et al. [185], Manni et al. [110], Takeuchi et al. [170], Givens et al. [59]) die Zusammensetzung der Asche im Partikelfilter nicht exakt die Schmierölzusammensetzung ab. Dies wird dadurch erklärt, dass (im Unterschied zu Kraftstoff) ein Großteil des Schmieröls nicht in flüssiger Form, sondern durch Abdampfung von heißen Oberflächen in den Brennraum gelangt. Dieser gasförmige Verbrauch macht dabei je nach Schmieröl zwischen 66 % und 75 % des Gesamt-Schmierölverbrauchs aus. Während die Zusammensetzung des Anteils an verbrauchtem flüssigem Öl der Zusammensetzung des Schmieröls in der Ölwanne entspricht, werden beim gasförmig verbrauchten Öl hauptsächlich die leicht verdampfenden Bestandteile in den Brennraum bzw. den Abgastrakt überführt. Zusätzlich zu diesen Effekten bilden die Verschleißminderer (hauptsächlich Phosphor) Verschleißschutzschichten, die ebenfalls zu einem scheinbaren Ölverbrauch führen. Abhängig vom Schmieröl lag dieser Anteil am Gesamtmassenverlust von Phosphor zwischen 30 % und 55 %. Nemoto et al. [124] kommen in ihren Untersuchungen anhand von Dauerlaufuntersuchungen über 600 Betriebsstunden zu einem ähnlichen Ergebnis bezüglich des Aufkonzentrierens von bestimmten Aschebildnern in der Schmierölwanne.

Zu den unterschiedlichen Findungsraten einzelner Metalle aus dem Schmieröltank im Abgasnachbehandlungssystem gibt es unterschiedliche Aussagen in der Literatur. Bardasz et al. [7] schreiben Phosphor die höchsten Findungsraten zu, abweichend dazu berichten Givens et al. [59] von Magnesium – vermutlich aufgrund der zu den erstgenannten Autoren abweichenden Entnahmestelle der Probe.

Übereinstimmend folgen in diesen und weiteren Untersuchungen [98] [9] Calcium und Zink. Generell reichen die in der Literatur veröffentlichten auf dem Gesamt-Sulfataschegehalt basierenden Findungsraten von 35 % [7] bis zu 75 % [64].

Der Einfluss von Verschleißmetallen auf die Ablagerungsbildung im DPF wird unterschiedlich bewertet. Im Rahmen der Untersuchungen von Givens et al. [59] wurde eine detaillierte Analyse der Aschezusammensetzung im DPF durchgeführt. Daraus ist unter anderem zu erkennen, dass auch Verschleißmetalle einen signifikanten Beitrag zur Aschebildung leisten. Diese Einschätzung teilen andere Autoren nicht, so stufen z. B. Manni et al. [110] den Einfluss entsprechender Metalle auf die Ablagerungsbildung im DPF als vernachlässigbar ein, solange sich der Verschleiß des Motors im üblichen Rahmen bewegt.

Zusätzlich zur eingelagerten Masse beeinflussen auch die physikalischen (Morphologie, Dichte) und chemischen Eigenschaften (Zusammensetzung) der Asche den Differenzdruck über den Partikelfilter, wie in den Untersuchungen von Takeuchi et al. [170] und Bardasz et al. [7] dargestellt. Allerdings kommen die beiden Studien zu unterschiedlichen Zusammenhängen, welche vermutlich durch die Ausführung des DPF (unbeschichtet bzw. katalytisch beschichtet) begründet sind.

Neben diesen, aus einer Vielzahl von existierenden Untersuchungen ausgewählten, Beiträgen zum Einfluss des Schmieröls auf die Partikelfilterbeladung widmen sich weitere Arbeiten dem Eingang bereits erwähnten Einfluss des **Kraftstoffs**.

In den Untersuchungen von Manni et al. [111] wurde unter anderem der Einfluss unterschiedlicher Schwefelgehalte im Kraftstoff auf die Ablagerungsbildung im DPF untersucht. Es konnte ein minimaler Unterschied in der Beladung des DPF selbst beobachtet werden. Wesentlich signifikanter war dagegen der Unterschied im vom DPF verursachten Abgasgedruck vor den Regenerationsphasen. Dieser war bei der Verwendung von schwefelarmem Kraftstoff deutlich niedriger. Die Differenz wurde auf die unterschiedliche Rußbeladung des Filters, abhängig vom Schwefelgehalt des Kraftstoffs, zurückgeführt. Grundsätzlich ist der Einfluss von in Kraftstoff (oder Schmieröl) vorhandenem Schwefel davon abhängig, ob gleichzeitig Metalle aus Kraftstoff oder Schmieröl an der Verbrennung beteiligt sind, da diese zur Bildung von Sulfataschen erforderlich sind. Neben dem geringen Einfluss von Schwefel wurde in denselben Untersuchungen eine deutliche Abhängigkeit der Ablagerungsbildung im DPF vom Vorhandensein von Barium im Kraftstoff festgestellt. Daraus resultierten große Mengen vor Bariumsulfat-Ablagerungen. Ein Einfluss der Ausführung des Kraftstofffilters auf die Aschebildung im DPF war nicht erkennbar.

Thuncke et al. [174] berichten in Untersuchungen zum Betriebs- und Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener BHKW von einem weißen Rückstand, welcher sich im DPF eines der untersuchten BHKW abgelagert hatte. Die Ablagerungen bestanden unter anderem aus Calcium (1,5 Masse-%), Phosphor (1,3 Masse-%), Zink (0,6 Masse-%), Magnesium (0,2 Masse-%) sowie geringeren Anteilen an Eisen, Kupfer, Chrom und Kalium. Neben Rückständen aus Schmieröladditiven sowie Verschleißmetallen vermuten die Autoren, dass insbesondere Phosphor aus Verbrennungsrückständen des Pflanzenölkraftstoffs stammt.

Von motorischer Relevanz ist jedoch nicht primär die gebildete und eingelagerte Ablagerungsmasse, sondern die daraus resultierende Änderung sowohl des Differenzdrucks über den DPF und damit des Abgasgedrucks im Auslasskanal als auch des Regenerationsverhaltens.

Ein durch kontinuierlichen Ascheeintrag verursachter Anstieg des Abgasgedrucks hat negative Auswirkungen auf Kraftstoffverbrauch, Leistung und eventuell Lebensdauer des Motors. Neben der Lastpunktverschiebung aufgrund der vergrößerten Ladungswechselarbeit ist insbesondere an Motoren mit Hochdruck-Abgasrückführung ein definiertes Druckgefälle zwischen Ansaug- und Abgasseite erforderlich, um richtige Abgasrückföhrtraten sicher zu stellen. Bei

turboaufgeladenen Motoren beeinflusst ein ansteigender Abgasgegendruck zusätzlich das Verhalten des Abgasturboladers und damit des Ladedrucks. [111] [64]

Dabei sind die Auswirkungen abhängig vom Betriebspunkt des Motors, wie Untersuchungen von Sutton et al. [169] zeigen. Während bei 1300 min^{-1} eine Gegendruckerhöhung um ca. 85 % zu maximal 1,6 % Kraftstoffmehrverbrauch führte, bewirkte ein ca. 87 % höherer Gegendruck bei 1700 min^{-1} nur einen Mehrverbrauch von maximal 0,75 %.

Verschiedene Untersuchungen beschäftigen sich neben dem Einfluss einer Aschebelastung auf den Differenzdruck auch mit den Auswirkungen der Asche auf die Regenerationstemperatur der Rußbelastung. [169] [7] [46] [170] Dabei zeigen unbeschichtete Partikelfilter keine signifikante Veränderung des Rußregenerationsverhaltens [169], während bei katalytisch beschichteten Filtern eine deutliche Beeinflussung der Regenerationstemperatur stattfindet. Dieser Einfluss unterliegt jedoch einem komplexen Zusammenspiel zwischen der Art des Verschleißschutzadditivs und der Art des Reinigungsadditivs. [7]

Einen weiteren Effekt stellten Fang und Lance fest [46]. Nach ihren Ergebnissen können Phosphor-Ablagerungen eine Isolationsschicht auf der Rußschicht bilden, welche die thermische Oxidation des Rußes behindern. Dieses Phänomen kann eventuell den von Takeuchi et al. [170] gefundenen Zusammenhang zwischen Phosphorgehalt und DPF-Differenzdruck erklären.

Generell können mit Asche beladene Filter nach einem Reinigungsvorgang, bei dem die Ascheablagerungen entfernt werden, wieder eingesetzt werden. Nuzzkowski et al. [126] beschreiben verschiedene Arten von Reinigungsverfahren (trocken, nass). Die turnusmäßige Aschereinigung von DPF wird dabei als normaler Bestandteil eines geschlossenen DPF-Systems angesehen.

2.2.4 Erkennung und Diagnose von Ablagerungen

In Kapitel 2.2.3 wurden die motorischen Folgen von Ablagerungsbildung im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem anhand der beim Dieselmotor typischen Ablagerungsorte dargestellt. Ziel von modernen Motormanagementsystemen muss es – neben anderen Aufgaben – auch sein, eine sich ankündigende Funktionsstörung oder einen sich ankündigenden Schaden rechtzeitig im laufenden Betrieb zu erkennen. Dabei muss unterschieden werden, ob ein System nur zur Erkennung eines Fehlers in der Lage ist, oder ob damit auch eine weitergehende Diagnose erfolgen kann.

Fahrzeugmotoren verfügen heute standardmäßig über eine On-Board-Diagnose-Funktion (OBD). Diese muss den Fahrer darüber informieren, ob der Verdacht auf eine signifikante Verschlechterung der Abgasemissionen im Betrieb vorliegt. [15] Aufgrund der fortschreitenden Emissionsgesetzgebung und der zunehmenden Anforderungen an die Langzeitstabilität von Abgasnachbehandlungssystemen („In-use compliance“) ist zukünftig mit einer Erweiterung der On-Board-Diagnose durch Onboard-Messfunktionen (OBM) zu rechnen. Fehér et al. [49] vergleichen die Diagnosemöglichkeiten eines OBD-Systems mit denen eines OBM-Systems. Palocz-Andresen beschreibt erste Erfahrungen mit OBM-Systemen zur kontinuierlichen Erfassung der Emissionen eines Nutzfahrzeugs im Realbetrieb [129]. Die gezielte Erkennung von Ablagerungsbildung ist derzeit noch nicht explizit in OBD- oder OBM-Systemen abgebildet. Mit Hilfe der in den nachfolgend vorgestellten Untersuchungen beschriebenen Methoden ist dies jedoch grundsätzlich denkbar.

Jonkers et al. [82] beschreiben zwei Verfahren, mit denen Ablagerungsbildung im Brennraum direkt gemessen werden kann. Das eine Verfahren basiert auf der Tatsache, dass Ablagerungen an den Brennraumwänden eine thermische Isolationsschicht darstellen. Dadurch wird die Amplitude der zyklischen Temperaturänderungen über ein Arbeitsspiel abgeschwächt sowie die Phasenlage verändert (verzögert). Bei bekannter (oder angenommener) thermischer Leitfähigkeit der Ablagerungen kann somit die Ablagerungsmasse an der instrumentierten Stelle im Brennraum bestimmt werden.

Problematisch an dieser Methode zur Quantifizierung ist, dass sich Ablagerungen in ihrer Zusammensetzung und damit auch ihrer thermischen Leitfähigkeit im laufenden Betrieb ändern. Dies zeigen Untersuchungen von Nishiwaki und Hafnan. Danach ist die thermische Leitfähigkeit der Ablagerungen von der Motorlast abhängig. Punkte niedriger Last führen zu niedriger Leitfähigkeit, jedoch zu größeren Ablagerungsdicken als Punkte hoher Last. [125]

Ähnliche Verfahren werden auch von Hopwood et al. [77] beschrieben. Ishii et al. [80] haben nach demselben Verfahren den Einfluss von Brennraummuldenablagerungen auf den Wärmestrom in den Kolben untersucht.

Das zweite von Jonkers et al. [82] beschriebene Verfahren bedient sich der elektrischen Leitfähigkeit von Ablagerungen. Verschiedene Arten von Ablagerungen weisen unterschiedliche chemische Strukturen auf, welche sich in ihrer elektrischen Leitfähigkeit unterscheiden. Im laufenden Betrieb eines Motors können sich die Ablagerungen in ihrer Struktur und Zusammensetzung abhängig von Betriebsprofil und Zeit ändern, damit ändert sich auch die Leitfähigkeit. Die Auswertung der Leitfähigkeit als Maß für Ablagerungsbildung ist aufgrund vieler Einflussgrößen wesentlich schwieriger als bei der Messung der Wandtemperatur. Bei entsprechender Kenntnis sind jedoch sowohl Aussagen über die Art als auch über die Menge der gebildeten Ablagerungen möglich.

Lepperhoff et al. [105] entwickelten ein Kompressionsvolumen-Messgerät, mit dem durch Ablagerungen hervorgerufene Änderungen des Verdichtungsverhältnisses gemessen werden können.

In den letzten Jahren haben im Bereich der Brennraumdrucksensoren erhebliche Weiterentwicklungen stattgefunden, welche den Einsatz derartiger Sensorik in der Serie ermöglichen. Die Entwicklung einer zylinderdruckbasierten Verbrennungsregelung für PKW-Dieselmotoren beschreiben z. B. Jeschke [81] oder Bürgler et al. [20]. Erste Motoren mit einem derartigen Motormanagementkonzept werden in Serienfahrzeugen eingesetzt. [66] [65]. Eine entsprechende Verbrennungsregelung für stationäre Gasmotoren wird von Eggers et al. beschrieben [40].

Diese Konzepte wurden primär zur Ausregelung von fertigungsbedingten Streubreiten von Serienmotoren, Umwelt- und Kraftstoffeinflüssen sowie zur Ausregelung der Unterschiede zwischen den einzelnen Verbrennungszyklen entwickelt. Eine Erweiterung auf die spezielle Erkennung von Ablagerungsvorgängen und die Einleitung möglicher Gegenmaßnahmen erscheint jedoch möglich, sofern sich Ablagerungen anhand ihrer Auswirkungen auf die Verbrennung ausreichend genau beschreiben lassen.

Gardiner et al. [55] untersuchten, ob anhand des Zylinderdrucks und der Abgastemperatur auf die Ablagerungsbildung im Brennraum eines Einzylinder-DI-Dieselmotors geschlossen werden kann. Der Motor wurde abwechselnd im Teillastbetrieb zur Ablagerungsbildung und im Vollastbetrieb zum Ablagerungsabbau betrieben. Die Ergebnisse zeigen ein eindeutiges Verhalten des Polytropenexponenten in der Kompressionsphase sowie der maximalen Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Beladung. Weitere untersuchte Größen, die auf der Messung der Abgastemperatur basieren, zeigen dagegen kein eindeutiges Verhalten.

Schreiner [159] beschreibt ein Verfahren, mit dem anhand von Trendaufzeichnungen eines Betriebsdatenrekorders der Verschmutzungs- oder Verschleißzustand von Motorbauteilen ermittelt werden kann. Ziel dieses Verfahrens ist es, den Zeitpunkt für notwendige Servicemaßnahmen frühzeitig festlegen zu können. Dadurch ist auch bei zustandsgesteuerten Wartungskonzepten eine zeitliche Planbarkeit der Einsätze gegeben (wie bei früheren zeitgesteuerten Wartungskonzepten).

Wichtige Elemente dieses Verfahrens sind:

- Plausibilitätsprüfung der Messwerte im Motorregler
- Bildung eines Referenzkennfeldes des neuen Motors; mit diesem Kennfeld werden die Messwerte im späteren Motorbetrieb verglichen und die Abweichung bewertet
- Berücksichtigung des Einflusses von Umgebungsbedingungen durch Umrechnung auf Norm-Umgebungsbedingungen

- Erneute Bildung eines Referenzkennfeldes, sobald während der Betriebszeit des Motors Komponenten gewechselt oder Einstellungen geändert werden

Neben den unterschiedlichen Verfahren zur Prognostizierung von Ablagerungen mittels Messungen wurde von Jonkers et al. [82] ein empirisches Modell erstellt, welches Ablagerungsmasse im Brennraum als Funktion von Zeit, Motortyp, Schmieröltyp und Betriebsprofil (Last, Einspritzdruck, Kühlwassertemperatur, Einspritzzeitpunkt) berechnet.

Schwarte et al. [160] entwickelten Verfahren zur modellbasierten Fehlererkennung und -diagnose für Dieselmotoren. Dabei wurden für verschiedene Baugruppen (Ansaugsystem, Verbrennung/Einspritzung/Triebwerk, Abgassystem) Erkennungsmethoden für Fehler entwickelt.

Die Erkennung von Ablagerungen war nicht spezielles Ziel bei der Methodenentwicklung, dennoch scheinen insbesondere zwei der vorgestellten Methoden dafür geeignet:

- Überwachung der Drehzahlsschwingungen
- Rekonstruktion der Einspritzmenge aus Luftmasse und Restsauerstoffgehalt im Abgas

Das drehzahlbasierte Verfahren der Überwachung von Drehschwingungen an der Kurbelwelle ist in der Arbeit von Schmidt et al. [157] detailliert beschrieben. Die im fehlerfreien Motorbetrieb über 180 °KW (entsprechend dem Zündabstand des untersuchten 4-Zylindermotors) gemessene mittlere Winkelbeschleunigung der Kurbelwelle dient als Referenz. Im Fehlerfall und dem daraus resultierenden unrunder Motorlauf ergibt sich ein abweichender Wert, der auf einen Fehler im Einspritzsystem hinweist. Eine Zuordnung eines Fehlers zum jeweiligen Zylinder ist möglich.

Eine detaillierte Betrachtung der Erkennung der eingespritzten Kraftstoffmasse anhand des Restsauerstoffgehalts im Abgas findet sich in einer Arbeit von Kimmich und Isermann. Eine mittels einer schnellen Breitbandlambdasonde erfasste Änderung des Restsauerstoffgehalts weist – bei konstanter Ansaugluftmasse - auf eine Änderung bei der eingespritzten Kraftstoffmasse hin. Unter Berücksichtigung der zylinderindividuellen Laufzeiten bis zur Lambdasonde lässt sich so die Einspritzmenge pro Arbeitsspiel für jeden Zylinder getrennt berechnen. Ein anschließender Vergleich mit der Soll-Einspritzmenge aus dem Einspritzkennfeld ermöglicht eine Fehlererkennung. [90]

2.2.5 Verfahren zur Beurteilung von Ablagerungsbildung

Zur Untersuchung der Ablagerungsvorgänge und zur Bestimmung ihrer Auswirkungen in den verschiedenen Bereichen des Verbrennungsmotors (Ansaugstrecke, Brennraum, Abgasstrecke) existieren eine Reihe von unterschiedlichen Prüfzyklen, die sich in der Regel auf einen Teilbereich der Ablagerungsbildung konzentrieren. Nachfolgend sind die Namen einiger Tests und deren Hauptaugenmerk genannt. Die Quellenangaben verweisen auf die Beschreibung des Zyklus selbst bzw. auf weiterführende Literatur zu Beladungsuntersuchungen unter Verwendung des jeweiligen Zyklus.

- „Mercedes Benz OM 616 Labor“ (Einspritzdüse) [162]
- „Mercedes Benz OM 616 Fahrzyklus“ (Einspritzdüse) [162]
- „VW Jetta Fahrzyklus“ (Einspritzdüse) [162]
- „Peugeot XUD9“ (Einspritzdüse) [162] [130]
- „Peugeot DW10“ (Einspritzdüse) [139]
- „200h-EMA“-Test (allgemeine Ablagerungsbildung und Verschleiß) [133]
- „Cummins L10 Deposit Test“ (Einspritzdüsen, speziell Lochdüsen) [162] [54]
- „Peterson torque test cycle“ [115]
- „Graupner-Klaau“-Zyklus (PKW-Einspritzdüsen) [62]

Neben diesen standardisierten bzw. zumindest von mehreren Autoren untersuchungsübergreifend verwendeten Prüfzyklen existiert noch eine Vielzahl weiterer individueller Zyklen. Aus diesem Grund sind Quervergleiche des Ablagerungsverhaltens oft sehr schwierig.

Grundsätzlich lassen sich die Prüfzyklen nach ihrer Zielgröße unterscheiden [139]:

- a) direkte Messung der Ablagerung (z. B. Tests zu Ventilablagerungen beim Otto-Motor)
- b) Messung der durch Ablagerungen verursachten Änderung eines verbrennungsrelevanten Parameters (z. B. Peugeot XUD9-Test zur Durchflussreduzierung bei Einspritzdüsen)
- c) Messung der motorischen Auswirkung der Ablagerung (z. B. Peugeot DW10-Test zur Leistungsminderung durch ESD-Ablagerungen)

Die Praxisrelevanz der Aussagen steigt dabei von a) nach c), gleichzeitig wird die Durchführung und Auswertung der Verfahren jedoch auch wesentlich anspruchsvoller.

Die Untersuchung der Ablagerungsbildung stellt insbesondere aufgrund der (teilweise) reversiblen Mechanismen sehr hohe Anforderungen an das Profil eines Prüfzyklus, da sichergestellt werden muss, dass die Abläufe im Zyklus auf den Realbetrieb übertragbar sind.

Vor diesem Hintergrund haben Hawthorne und André [73] anhand von Fahrzeugbetriebsprofilen für verschiedene Betriebszustände einen Relevanzgrad („Severity Index“) für die Bildung von Ablagerungen definiert. Damit können verschiedene Einflüsse des Betriebsprofils (Fahrzeit, mittlere Geschwindigkeit und Standzeit mit ausgeschaltetem aber noch heißem Motor) gegeneinander gewichtet werden.

Um in möglichst kurzen Versuchszeiten ausreichende Mengen an Ablagerungen zu erhalten, werden bei den Tests teilweise mit Zinksalz dotierte Kraftstoffe eingesetzt (z. B. beim Peugeot DW10-Test) [139]. Obwohl dieses Verfahren als grundsätzlich zur verstärkten Ablagerungsbildung geeignet angesehen wird, bestehen dennoch Zweifel, inwieweit die damit gebildeten Ablagerungen mit den unter Realbedingungen gebildeten Ablagerungen vergleichbar sind.

Neben diesen Prüfzyklen für den „realen“ Motor gibt es weiterhin eine Reihe von Laborverfahren, um die Ablagerungsneigung von Kraft- oder Schmierstoffen auf heißen Oberflächen zu untersuchen: [33]

- „WOLF Streifentest“
- „ISUZU Coker Test“
- „PSA Panel Coker Test“
- „Inlet System Deposit Simulator“
- „SHELL Life-Oxidation Test“
- „SHELL LLK-Simulation“
- „TEXACO Diesel Engine Piston Deposits“
- „CONRADSON Carbon Test“
- „SAE 840262 Hot Tub Test“
- „MTU LLK-Simulation“

Nach Daniel et al. [32] gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten, Ablagerungen im Brennraum physikalisch zu beschreiben:

- Gravimetrische Bestimmung der Ablagerungsmasse (zuverlässig, genau)
- Schichtdickenmessung (zuverlässig, genau; jedoch sind Messungen an verschiedenen Stellen eines Bauteils erforderlich, da die Schichtdicke nicht konstant ist; dies bedeutet einerseits mehr Aufwand bei der Ermittlung, bietet jedoch die Möglichkeit zur differenzierteren Beschreibung)
- Beschreibung (Rating): (zeitaufwändig, speziell geschultes Personal erforderlich, um objektive Ergebnisse zu erhalten)

Untersuchungen des Coordinating Research Council im Rahmen der Definition eines neuen Prüfzyklus für ottomotorische Ablagerungen zeigen eine ausreichend gute Korrelation ($R^2=0,7893$) zwischen der Schichtdickenmessung und der gravimetrischen Bestimmung der Ablagerungsmasse. Aus diesem Grund wurde für das neu zu definierende Prüfverfahren nur die gravimetrische Bestimmung vorgesehen. [32]

Zusätzlich zu den Verfahren zur physikalischen Beschreibung gibt es eine Reihe von Möglichkeiten zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Ablagerungen. Einen Überblick über diese Verfahren liefern Daniel et al. [33] im Rahmen von Untersuchungen zu Ablagerungen auf der Reinluftseite von Heavy-Duty-Dieselmotoren.

Die genannten Verfahren sind:

- Infrarot-Spektroskopie
- Atomabsorptions-Spektroskopie (Elementaranalyse)
- Atomemissions-Spektroskopie (Elementaranalyse)
- Thermogravimetrie
- Pyrolyse – Gaschromatographie – Massenspektroskopie

Neben den allgemein anwendbaren Methoden zur Beurteilung von Ablagerungen existieren insbesondere für die Ablagerungsbildung auf und in Einspritzdüsen und Kolben weitere spezielle Verfahren, die teilweise auch die funktionalen Auswirkungen der Ablagerungen quantifizieren.

Die Beurteilung der Ablagerungen am Kolben erfolgt anhand von Bewertungstabellen, in denen unterschiedliche Bereiche des Kolbens anhand ihres Aussehens mit einer Punktzahl bewertet werden. Entsprechende Verfahren wurden beispielsweise von Kruppke oder Baist entwickelt. [97] Daraus abgeleitete Verfahren sind in der DIN 51361-2 beschrieben. Darüber hinaus existieren herstellerspezifische Prüf- und Beurteilungsverfahren, z. B. von Volkswagen die Prüfvorschrift „P-VW 1431“. Ein Vergleich verschiedener Verfahren findet sich bei Möller und Nassar. [122]

Zur Beurteilung der Ablagerungsbildung an der Einspritzdüse existieren eine Vielzahl unterschiedlichster Verfahren. Dies ist dadurch begründet, dass die Einspritzdüse das gegenüber Ablagerungsbildung sensibelste Bauteil ist und eine – zumindest teilweise – Funktionsprüfung der Einspritzdüsen auch außerhalb des Brennraums möglich ist. Folgende Beurteilungsmethoden sind bislang bekannt:

- pneumatische Durchflussmessung nach DIN ISO 4010 [162]
- hydraulische Durchflussmessung, auch spritzlochselektiv [132]
- mechanische Vermessung des Spritzlochdurchmessers mit Lehrdrähten [115]
- Vermessung der inneren Düsengeometrie mittels eines Silikon-Abdrucks [132]
- Projektion des Profils der Einspritzdüsenkuppe in mehreren Ansichten [60] [94] [135] [57] [142] [118]
- Durchlichtprojektion einzelner Düsenlöcher [115]
- Optische Erfassung der Einspritzstrahlen bei Prüfung im Einspritzdüsenprüfgerät [142] oder einer speziellen Druckkammer [132]
- Messung des Einspritzstrahlimpulses mittels Drucksensoren [132]

Der Verbreitungsgrad der einzelnen Verfahren ist unterschiedlich. Während die pneumatische bzw. hydraulische Durchflussmessung Standardverfahren zur Beurteilung von Einspritzdüsenablagerungen sind, kommen die anderen Verfahren bislang hauptsächlich in wissenschaftlichen Arbeiten zum Einsatz.

Zur Aussagekraft und Vergleichbarkeit der Ergebnisse der pneumatischen bzw. hydraulischen Durchflussmessung gibt es unterschiedliche Aussagen in der Literatur. Nach Aussage von Sengers und Olsen [162] sowie den von ihnen zitierten Quellen ist bei Mehrlochdüsen eine Beurteilung der Ablagerungsbildung nach DIN ISO 4010 nicht aussagekräftig. Von Einspritzdüsenherstellern werden teilweise jedoch auch bei der Beurteilung von Mehrlochdüsen beide Verfahren parallel angewendet. Wenn möglich ist zur Bewertung von Ablagerungen ein pneumatisches Verfahren vorzuziehen, da dabei die Gefahr der mechanischen Beschädigung der Ablagerungen geringer einzustufen ist als bei hydraulischen Verfahren. Prinzipbedingt ist eine spritzlochselektive Quantifizierung der Ablagerungen bei beiden Verfahren nur mit einem erheblichen Mehraufwand möglich (vgl. [132]).

In Untersuchungen von Godrum et al. [60] zur Düsenbelagsbildung von drei unterschiedlichen alternativen Dieselkraftstoffen werden Ergebnisse der Profilprojektion der Einspritzdüsenkuppe

präsentiert. Auffällig ist dabei, dass die Standardabweichung der durch Ablagerungen gebildeten zusätzlichen Projektionsfläche bei drei Wiederholungsprüfläufen zwischen 12,1 % und 39,3 % (Motor A) bzw. 3,5 % und 44,1 % (Motor B) beträgt. Die Autoren vermuten, dass die großen Abweichungen durch die teilweise reversiblen Belagsbildungsvorgänge an der Einspritzdüse verursacht wurden. Die Standardabweichung des optischen Messverfahrens selbst wird mit kleiner 1 % angegeben. Eine Aussage zu den Auswirkungen der Belagsbildung auf das Spritzbild der Einspritzdüsen bzw. das Betriebs- und Emissionsverhalten der Motoren wird – wie auch in Untersuchungen von Peterson et al. [135] - nicht gemacht.

Ein ähnliches Verfahren wird von Mendoza et al. [118] zur Beurteilung der Belagsbildung auf Einspritzdüsen beim Betrieb mit Diesel-Ethanol-Gemisch eingesetzt. Auch hier wird dem Verfahren grundsätzlich eine hohe Aussagekraft zugesprochen, dennoch liegt die Wiederholbarkeit teilweise in derselben Größenordnung wie die gemessenen Unterschiede zwischen verschiedenen Betriebsdauern der Einspritzdüsen.

Im Unterschied zur Profilprojektionsmethode beschreiben McDonnell et al. [115] ein Verfahren zur optischen Vermessung der einzelnen Lochquerschnitte einer Einspritzdüse. Abbildung 23 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Verfahrens. Damit konnten bereits nach sehr kurzer Laufzeit (< 1 Betriebsstunde) Unterschiede in der Belagsbildung ermittelt werden, die eine gute Korrelation mit dem Pflanzenölanteil im Kraftstoff aufweisen. Welche Auswirkungen die jeweilige Ablagerungsbildung auf das Spritzbild der Einspritzdüsen oder das Betriebs- und Emissionsverhalten hat, wurde nicht untersucht.

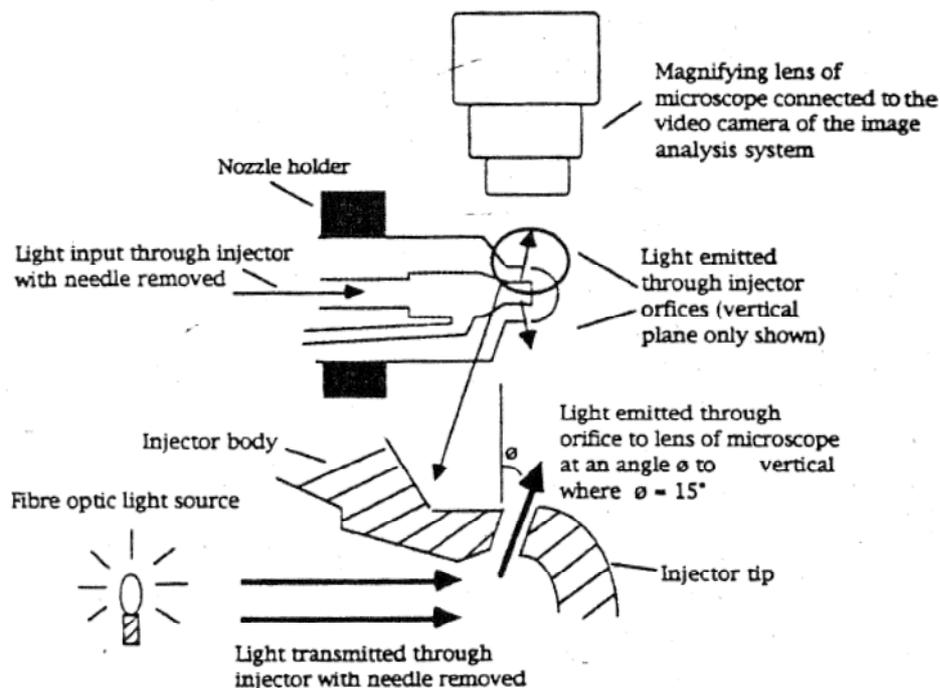


Abbildung 23: Prinzipieller Aufbau des Verfahrens zur optischen Vermessung von Düsenlöchern [115]

Zur lochselektiven Beurteilung von heute gebräuchlichen DI-Düsen haben Payri et al. [132] vier der bereits vorgestellten Verfahren verglichen. Alle vier Verfahren (geometrische Vermessung mittels Silikonabdruck, Massenstrommessung, Messung des Einspritzstrahlimpulses, optische Vermessung des Einspritzstrahls) zeigten eine grundsätzliche Übereinstimmung in der Darstellung von Strömungsunterschieden der einzelnen Spritzlöcher. Besonders hervorgehoben wird die sehr gute Korrelation zwischen der Massenstrommessung und der Messung des Einspritzstrahlimpulses der jeweiligen Spritzlöcher.

2.2.6 Vermeidung von Ablagerungsbildung/Minimierungsstrategien bzw. Reduzierung der Auswirkungen

Ziel einer Motor- und Kraftstoffentwicklung muss es sein, einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. In Bezug auf Ablagerungen und die damit verbundenen Funktionsbeeinträchtigungen sind zwei grundsätzliche Ansätze zu unterscheiden, die sich in der Praxis jedoch ergänzen können:

- Vermeidung des kontinuierlichen Aufbaus von Ablagerungen
- Minimierung der Auswirkungen von Ablagerungen

Die prinzipiellen Möglichkeiten zur **Vermeidung von Ablagerungsbildung** lassen sich aus den Kapiteln zu den Bildungsmechanismen ableiten. Nach Lepperhoff und Houben [103] sind dies:

- verbesserte Kraftstoffzusammensetzung
- verbesserte Schmierölzusammensetzung
- Verwendung von Additiven
- konstruktive Maßnahmen

Hage leitet aus seinen Untersuchungen zur Einspritzdüsenverkokung [67] folgende Strategien zur Minimierung von Ablagerungsbildung an Einspritzdüsen ab:

- Einsatz von Additiven
- Änderung der Lage der Düse im Brennraum (Veränderung der Strömungsverhältnisse an der Düsenstirnseite)
- Änderung des Führungsspiels der Düsennadel

Der Einsatz von Additiven zur Reduzierung des Ablagerungsaufbaus an Einspritzdüsen wurde von Caprotti et al. [21] genauer untersucht. Verschiedene Reinigungsadditive wurden hinsichtlich ihres Potentials in Kombination mit zwei Dieselmotorkraftstoffen, welche mit 3 ppm Zink dotiert waren, getestet. Dabei wurde ein grundsätzlich verringerter Ablagerungsaufbau bei Verwendung eines Reinigungsadditivs festgestellt. Zu einer ähnlichen Aussage kommen auch Leedham et al. [100]. Handelsübliche Reinigungsadditive zeigten auch hier Ablagerungsminderungspotential beim Einsatz in Zn-dotiertem Kraftstoff. Fuentes-Afflick et al. [51] sehen in der Additivierung von Kraftstoffen eine unterstützende Maßnahme, um Ablagerungsbildung zu verringern, das größte Minderungspotential liegt jedoch in der konstruktiven Ausführung des Motors selbst.

Laut Lepperhoff und Houben [103] liegt der konstruktive Schlüssel zur Reduzierung oder gar Vermeidung von Ablagerungsbildung im Brennraum darin, die „flüssige Klebeschicht“ auf Wänden zu vermeiden. Insbesondere an der Einspritzdüse ist dies jedoch nicht möglich.

Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Bauteiltemperatur auf die Ablagerungsbildung wurden bereits in Kapitel 2.2.2.2 und 2.2.2.3 sowie 2.2.3.1 vorgestellt. Dennoch existieren vergleichsweise wenig Arbeiten, die das Ablagerungsverhalten bei gezielter Variation der Bauteiltemperatur untersuchten.

Die typische Temperaturverteilung am Ventil ist in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt, wobei die absoluten Temperaturwerte von Motor zu Motor und abhängig vom Betriebspunkt variieren. Aufgrund der im Vergleich zur Ansaugluft deutlich heißeren Auspuffgase liegt das Temperaturniveau des Auslassventils dabei deutlich über dem des Einlassventils.

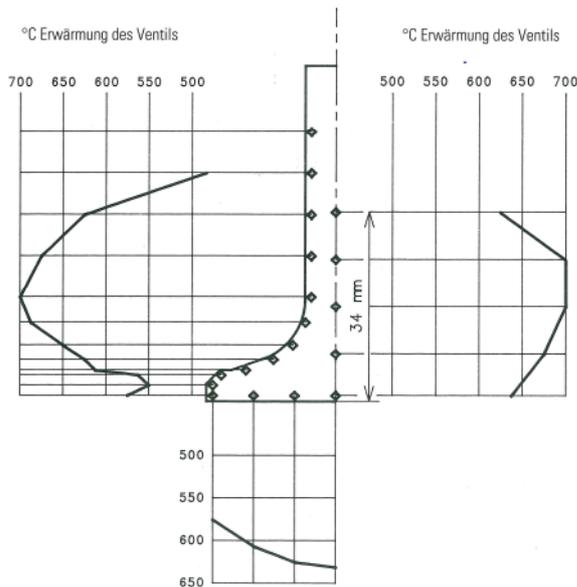


Abbildung 24: Temperaturverteilung am Vollventil [107]

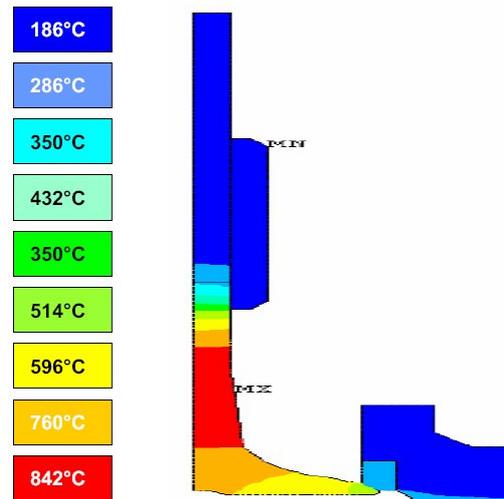


Abbildung 25: Temperaturverteilung an einem Auslassventil [107]

Daneshgari [31] berichtet in einer Arbeit zum Einfluss des Kraftstoffs auf die Einlassventilverkockung des Ottomotors von einer deutlichen Reduzierung der Ablagerungsbildung bei einer verbesserten Wärmeabfuhr vom Einlassventil. Seinen Untersuchungen zufolge tritt Einlassventilverkockung erst bei Oberflächentemperaturen von über 200 °C auf. Durch den Einsatz von Ventilsitzring-Materialien mit höherer Wärmeleitfähigkeit konnte eine Temperaturabsenkung um 25 K erzielt werden. Dadurch sank der Zeitanteil von kritischen Oberflächentemperaturen im Prüflauf auf unter 50 %, wodurch sich die Ablagerungsmengen um 50 % oder mehr verringern ließen.

In derselben Arbeit wird auch der positive Effekt einer niedrigeren Kühlwassertemperatur erwähnt. Die damit ebenfalls erreichbare Reduzierung der Ablagerungsbildung um über 50 % wurde jedoch bei einer in der Praxis nicht realistischen Kühlwassertemperatur von 20 °C beobachtet. Eine Aussage, in welchem Maße sich kleinere – im normalen Betrieb realisierbare – Absenkungen der Kühlwassertemperatur um 10-20 K auswirken, wurde nicht gemacht. In wie weit diese Ergebnisse auf die Ablagerungsbildung bei Dieselmotoren übertragbar sind, ist unklar, da keine entsprechenden Veröffentlichungen vorliegen.

Versuche von Schommers [158], die Ablagerungsbildung auf Einlassventilen von Ottomotoren durch Polieren der Oberfläche zu vermeiden, zeigten keinen Effekt. Ähnliche Versuche von Bitting et al. [14] mit polierten, verchromten, bornitrit-, gleitlack- und katalytbeschichteten Oberflächen waren ebenfalls erfolglos. Auch hier sind keine vergleichbaren Untersuchungen an Dieselmotoren bekannt.

Neben den von Lepperhoff und Houben [103] bzw. Hage [67] genannten Aspekten kann auch das Betriebsprofil eines Motors die Ablagerungsbildung beeinflussen. So berichten z. B. Graupner et al. [62], dass während des Kaltstarts ein durch thermische Spannungen verursachter Abbruch von Ablagerungen an der Einspritzdüse erfolgen kann.

Zusätzlich zur Vermeidung von Ablagerungsbildung kann die Betriebssicherheit eines Motors auch durch Maßnahmen zur **Minimierung der Auswirkungen** bereits erfolgter Ablagerungsbildung erhöht werden.

Wie im Kapitel 2.2.3.1 bereits erwähnt, stehen derartige Maßnahmen an Einspritzdüsen jedoch meist in Konflikt mit den Anforderungen der Emissionsgesetzgebung.

Am Partikelfilter hingegen lassen sich verschiedene konstruktive Möglichkeiten vergleichsweise einfach realisieren. Mit sogenannten „offenen Filtersystemen“, welche nur einen Teil der Partikel

abscheiden und damit auch einen Teil der eingetragenen Asche kontinuierlich wieder aus dem Filter austreten lassen, kann die Verblockung des Filters vermieden bzw. zumindest deutlich hinausgezögert werden. Allerdings entsprechen derartige Filtersysteme oft nicht den Anforderungen an Partikel- oder Staubemissionen.

Bei geschlossenen Filtersystemen besteht neben der grundsätzlichen - wenn auch am ausgeführten Motor oft begrenzten - Möglichkeit zur Vergrößerung des Filtervolumens weiteres Potential durch die Wahl des Filterkonzepts und seiner Ausführung. So unterscheiden sich verschiedene Filterkonzepte hinsichtlich der volumenspezifischen Aschekapazität und dem beladungsbezogenen Druckverlust. Abbildung 26 zeigt den durch Ruß bzw. Asche verursachten Druckverlust über den Filter in Abhängigkeit der Beladung für einen keramischen Silizium-Karbid-Partikelfilter (SiC) und einen Sintermetall-Partikelfilter (SMF). [168] Trotz dieser offensichtlichen Vorteile konnten sich derartige Filter insbesondere aufgrund der mangelnden mechanischen Langzeitstabilität bislang nicht am Markt durchsetzen.

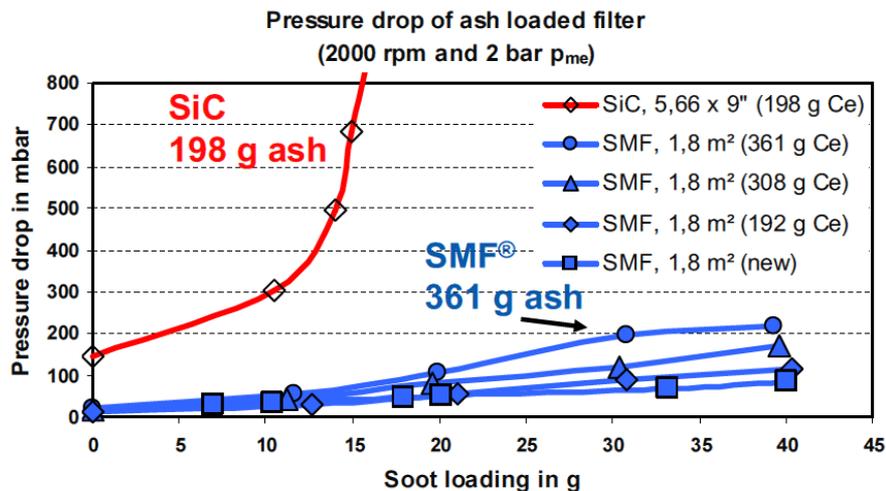


Abbildung 26: Vergleich des Druckverlusts von SiC- und SMF-Partikelfiltern (Messung) [168]

Bei keramischen Partikelfiltern ermöglichen asymmetrische Kanäle (größere Kanalquerschnitte der auf der Anströmseite offenen Kanäle im Vergleich zu den auf der Abströmseite offenen Kanälen) eine Erhöhung der Aschespeicherkapazität um bis zu 50 % (siehe Abbildung 27). [196] [127] [3]

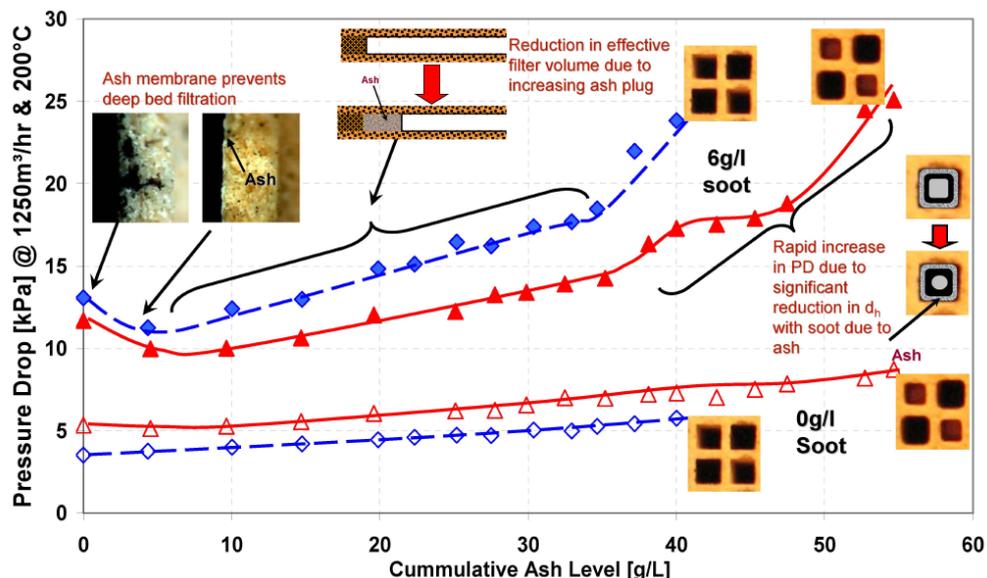


Abbildung 27: Vergleich des Druckverlusts zwischen symmetrischer und asymmetrischer Kanalstruktur [3]

3 Problemstellung und Zielsetzung

Trotz der Vielzahl der bereits zu den Themen „Ablagerungsbildung“ und „Einsatz von Rapsölkraftstoff“ durchgeführten verbrennungsmotorischen Untersuchungen sind noch immer Teilbereiche in den jeweiligen Themengebieten nicht eindeutig geklärt. In den folgenden Unterkapiteln ist zunächst der Status quo dieser beiden Themengebiete zusammengefasst. Aus den offenen Fragen ergibt sich die anschließend vorgestellte Zielsetzung dieser Arbeit.

3.1 Ablagerungsbildung

Die Problematik der Ablagerungsbildung begleitet den Verbrennungsmotor unabhängig von der Art des eingesetzten Kraftstoffs. Aus diesem Grund existiert eine Vielzahl von Untersuchungen sowohl zu den grundlegenden Mechanismen von Ablagerungsbildung und -transport als auch zum Verhalten einzelner Bauteile. Während die grundlegenden Mechanismen allgemein anerkannt sind, widersprechen sich die Untersuchungsergebnisse zu einzelnen Bauteilen teilweise. Der Grund dafür ist in unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Unterschieden in der Zusammensetzung der an der Ablagerungsbildung beteiligten Ausgangsprodukte zu suchen.

Ablagerungen sind überwiegend kraftstoff- oder schmierölstämmig, weitere Quellen, wie z. B. Verschleißmetalle oder Verunreinigungen der Ansaugluft, werden nur vereinzelt erwähnt und spielen in der Regel keine signifikante Rolle. Bei mineralischen Kraftstoffen und bei Schmierölen sind insbesondere für Ascheablagerungen oftmals Additive verantwortlich. Hier besteht ein Zielkonflikt zwischen den erwünschten Eigenschaften derartiger Additive (Verschleißschutzadditive im Schmieröl; DPF-Regenerationsadditive im Kraftstoff) und den aus ihrem Einsatz resultierenden Ablagerungen im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem.

Widersprüchliche Aussagen finden sich zum Einfluss der Oberflächentemperatur und des Betriebsprofils. Ein Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der Ablagerungsbildung wird von vielen Autoren bestätigt, die Richtung und Ausprägung jedoch unterschiedlich bewertet. Grundsätzlich begünstigt ein großes Temperaturgefälle zur Wand (d. h. niedrige Wandtemperatur) den Transport von ablagerungsfähigem Material auf die Bauteiloberfläche. Allerdings muss als Grundvoraussetzung zur Ablagerungsbildung zunächst eine klebrige Haftschrift entstehen; deren Bildung wird durch eine hohe Oberflächentemperatur begünstigt. Es ist weiterhin möglich, dass bei bereits benetzten Oberflächen eine hohe Temperatur weitere Ablagerungsvorgänge sowie chemische Prozesse, die einen Aufbau von Ablagerungen forcieren, begünstigt, während bei trockenen Oberflächen der Transporteinfluss überwiegt. Übersteigt die Oberflächentemperatur eine gewisse Grenze, können dadurch Ablagerungen auch teilweise wieder abgebaut werden.

Aus den entsprechenden Untersuchungen geht nicht immer hervor, ob bei der Betrachtung zwischen einzelnen Bauteilen oder Bereichen des Brennraums unterschieden werden muss. Diese Frage ist jedoch insbesondere unter dem Aspekt des Einflusses von direkter Kraftstoffbenetzung von Bedeutung.

Weiterhin ist unklar, ob das absolute Temperaturniveau entscheidend ist, oder ob die Konstanz einer vorherrschenden Temperatur bzw. das Auftreten von Temperaturschwankungen einen höheren Einfluss auf die Ablagerungsbildung nimmt. Dieses Wissen ist jedoch erforderlich, um bislang widersprüchlich erscheinende Aussagen in der Literatur entsprechend ihrer Randbedingungen gruppieren und besser verstehen zu können. Zudem kann auf dieser Grundlage gezielt auf die Ablagerungsbildung eingewirkt werden.

Sollte das absolute Temperaturniveau ausschlaggebend sein, so kann diesem (bei vorgegebenem Betriebspunkt) durch konstruktive Maßnahmen Rechnung getragen werden. Ist jedoch die Konstanz einer vorherrschenden Temperatur entscheidend, so kann darauf nur durch Vorgabe eines geeigneten Betriebsprofils gezielt Einfluss genommen werden.

Ähnlich uneinheitlich sind die Aussagen zum Einfluss des Betriebsprofils. Hier besteht insbesondere an der Einspritzdüse ein komplexer Zusammenhang zwischen den für einen Ablagerungsabbau vorteilhaften Temperaturunterschieden durch transienten Betrieb oder während einer Startphase, und den ablagerungsfördernden Stillstandsphasen, in denen Restkraftstoff in der Einspritzdüse einer hohen thermischen Belastung ausgesetzt ist. Der Grad dieser Belastung ist wiederum abhängig von dem vorangegangenen Betriebsprofil und dem daraus resultierenden Temperaturniveau. Eine zeitlich hochaufgelöste Langzeitbeobachtung wurde bislang in diesem Zusammenhang noch nicht durchgeführt, in der Regel erfolgte bei Prüfläufen über mehrere hundert Betriebsstunden eine zeitlich nur grob aufgelöste Datenerfassung und -auswertung.

Neben der Bildung von Ablagerungen beschäftigen sich viele Untersuchungen auch mit deren Auswirkungen. Diese lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen:

- Veränderung des Betriebsverhaltens
- Veränderung des Emissionsverhaltens
- Mechanische Schädigung des Motors

Eine Veränderung des Betriebsverhaltens äußert sich meist in Form von Leistungsverlust, Anstieg des Kraftstoffverbrauchs und verändertem Laufgeräusch. Das Emissionsverhalten wird einerseits durch eine verstimmte Einspritzung und schlechtere Gemischaufbereitung negativ beeinflusst. Weiterhin verursachen Ablagerungen im Abgassystem eine höhere Ladungswechselarbeit und können den Grad der Zylinderspülung verändern. Ablagerungen im Ansaugbereich können insbesondere bei direkteinspritzenden Dieselmotoren den für eine einwandfreie Gemischbildung erforderlichen Drall empfindlich stören.

Eine mechanische Schädigung des Motors kann z. B. durch festsitzende Kolbenringe erfolgen. Bei direkteinspritzenden Dieselmotoren kann außerdem ein durch Ablagerungen beeinflusstes Strahlbild der Einspritzdüse zu lokaler Überhitzung des Kolbens und in Extremfällen sogar zum Durchbrennen führen.

Zur Beurteilung von Ablagerungsbildung existieren eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren, sowohl zur gezielten Generierung der Ablagerungen als auch zur anschließenden Befundung der einzelnen Komponenten. Insbesondere für die Einspritzdüse als sensibelstes Bauteil ist – mit Ausnahme der von Einspritzdüsenherstellern durchgeführten Bestimmung des hydraulischen Gesamtdurchflusses – noch keine einheitliche Methode zur Quantifizierung der Belagsbildung vorhanden.

Offene Fragen bestehen hinsichtlich möglicher Methoden zur spritzlochselektiven Befundung sowie generell hinsichtlich der Aussagekraft von unter Umgebungsbedingungen durchgeführten Beurteilungsverfahren. Neben dem hydraulischen Verhalten ist dabei insbesondere das Zerstäubungsverhalten der Einspritzdüse nur schwer zu quantifizieren.

Durch eine frühzeitige Erkennung der Ablagerungsbildung bereits während des Betriebs könnten oben genannte ablagerungsbedingte Schäden vermieden werden. Grundsätzliche Ansätze dazu sind in verschiedenen Arbeiten beschrieben, werden aber bislang noch nicht speziell zur Diagnose von Ablagerungsbildung eingesetzt.

Eine weitergehende, differenziertere Betrachtung der durch Ablagerungen hervorgerufenen Einzeleffekte und ihrer Erkennung wurde noch nicht durchgeführt. Da Ablagerungsbildung an verschiedenen Stellen im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem zu unterschiedlichen Auswirkungen führt, sollte mit einem derartigen Verfahren eine präzise Aussage zum aktuellen Stand der Belagsbildung bei laufendem Motor möglich sein. Daraus lassen sich gegebenenfalls Regenerationsmaßnahmen ab- und einleiten.

In einer Vielzahl von Untersuchungen zur Ablagerungsbildung werden nur die absoluten oder relativen Änderungen einer Messgröße über eine bestimmte Versuchsdauer dargestellt und ausgewertet. Diese Ergebnisse liefern jedoch keine Aussage zum zeitlichen Verlauf der Veränderung.

Der zeitliche Verlauf ist prinzipiell zwar in Form einer Zeitreihe grafisch darstellbar, ein Vergleich verschiedener Einflussfaktoren dadurch aber nur qualitativ möglich. Insbesondere bei Langzeit-

prüfläufen ist eine entsprechende Auswertung sehr zeitintensiv und das Ergebnis aufgrund der händischen Vorgehensweise nur subjektiv.

3.2 Einsatz von Rapsölkraftstoff

Rapsölkraftstoff unterscheidet sich in einigen physikalischen und chemischen Eigenschaften (Zusammensetzung, Viskosität, Siedelinie, Oberflächenspannung) von mineralischem Dieselloskraftstoff. Dadurch werden das Einspritzverhalten und die Verbrennung beeinflusst. Bei fehlender oder unzureichender Anpassung des Motors an den Betrieb mit Rapsölkraftstoff kann dies – unabhängig von der Art der Ölgewinnung (Kaltpressung oder Raffination) – zu vermehrten Brennraumablagerungen führen.

Zusätzlich können bestimmte Bestandteile des Rapsölkraftstoffs zu weiterer Ablagerungsbildung sowohl im Brennraum als auch in Abgasnachbehandlungssystemen führen. Als in dieser Hinsicht kritische Bestandteile gelten Phosphor, Calcium und Magnesium. Aus diesem Grund wurde z. B. der Grenzwert für Phosphor im Rahmen der Arbeiten zur Normung von Rapsölkraftstoff in mehreren Schritten immer weiter abgesenkt. Allerdings fehlen eindeutige differenzierte Aussagen zum Einfluss dieser Komponenten auf die Ablagerungsbildung an unterschiedlichen Orten in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem, da bei vielen durchgeführten Untersuchungen weder die genaue Zusammensetzung des verwendeten Kraftstoffs noch die Rahmenbedingungen der Untersuchungen genannt sind.

Darüber hinaus sind der Einfluss des Betriebsprofils sowie der daraus resultierenden Oberflächentemperaturen und deren Konstanz nicht geklärt. Auch bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff wird ein Zusammenhang zwischen hohen Temperaturen und starker Ablagerungsbildung vermutet. Es wäre jedoch falsch, daraus zu schließen, dass ein Betrieb des Motors mit niedrigerem Mitteldruck (niedriges Drehmoment, Schwach- bzw. Teillastbetrieb) und einem damit generell niedrigeren Temperaturniveau vorteilhaft ist.

Insbesondere die Untersuchungen im Rahmen des „100-Traktoren-Demonstrationsprojektes“ zeigen deutlich, dass in diesen Betriebsbereichen andere Probleme speziell bei direkteinspritzenden Motoren auftreten (hoher Kraftstoffeintrag in das Schmieröl aufgrund unvollständiger Verbrennung wegen niedriger Brennraumtemperaturen). Aus diesem Grund wird in der Literatur meist der Vollast-Dauerlaufbetrieb als idealer Zustand dargestellt, ungeachtet der daraus resultierenden Oberflächentemperaturen. Eine differenziertere Betrachtung der Einflüsse von Temperaturniveau und -konstanz ist daher erforderlich.

Der Einsatz von Partikelfiltern bei rapsölkraftstoffbetriebenen Motoren wird in einzelnen Arbeiten beschrieben, eine genaue Untersuchung im Hinblick auf Ablagerungsbildung ist jedoch noch nicht erfolgt.

3.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Ablagerungsbildung in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem eines BHKW-Dieselmotors mit Direkteinspritzung und Partikelfilter in Abhängigkeit von

- Kraftstoffzusammensetzung,
- Betriebsprofil sowie
- konstruktiven Varianten zur Beeinflussung der lokalen Oberflächentemperatur im Brennraum

zu untersuchen. Dazu sollen sowohl die Ablagerungen selbst als auch die daraus resultierenden Veränderungen des Betriebs- und Emissionsverhaltens ausgewertet werden.

Abbildung 28 zeigt die variierten Eingangsgrößen und Einflussfaktoren sowie die Zielgrößen der Untersuchungen.

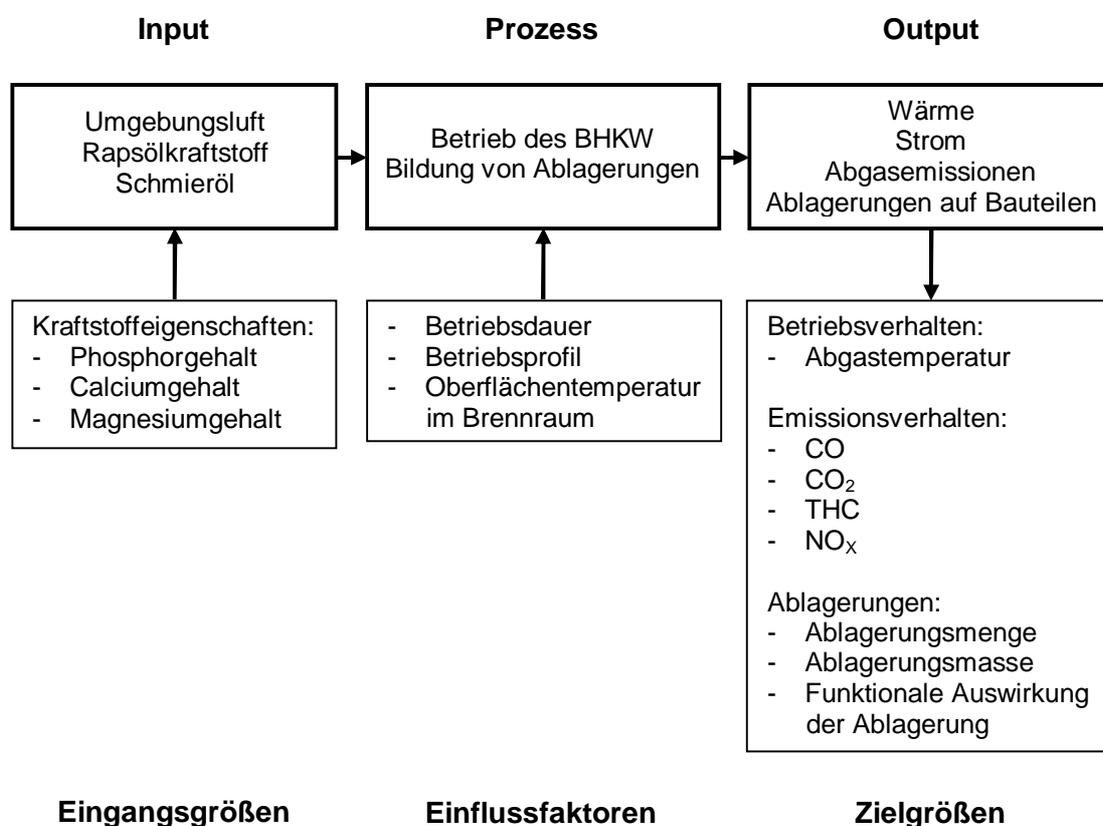


Abbildung 28: Eingangsgrößen und Einflussfaktoren sowie Zielgrößen der Untersuchungen – Teil 1

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf typische Betriebsbedingungen von Blockheizkraftwerken, da diese – neben landwirtschaftlich genutzten Fahrzeugen – das Haupteinsatzgebiet von Pflanzenölkraftstoffen darstellen. In BHKW mit einer elektrischen Leistung kleiner 10 kW wird dabei nahezu ausschließlich Rapsölkraftstoff eingesetzt [173].

Unter diesen Rahmenbedingungen soll geklärt werden, ob eine für einen störungsfreien Betrieb erforderliche Mindest-Kraftstoffqualität definiert werden kann. Dabei sind die Quereinflüsse des Betriebsprofils und konstruktiver Varianten zu berücksichtigen.

Im Fokus der Untersuchungen stehen die Kraftstoffkomponenten Phosphor, Calcium und Magnesium, deren Elementgehalte in eigens dafür produzierten Versuchskraftstoffen gezielt variiert werden sollen. Vor dem Hintergrund der Normung von Rapsölkraftstoff ist die Frage

nach Grenzwerten für derartige Begleitstoffe von großer Bedeutung, insbesondere weil die erzielbaren Minimalkonzentrationen stark von den Randparametern und den einzelnen Prozessschritten bei der Ölgewinnung abhängen. Unnötig strenge Vorgaben können daher zu erhöhten Kraftstoffgewinnungskosten führen.

Wie in der Problemstellung aufgezeigt, ist derzeit kein Verfahren bekannt, mit dem der Verlauf einer Ablagerungsbildung quantifiziert werden kann. Daher soll im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt werden, mit der sich aus zeitbasierten Signalverläufen Ergebniswerte berechnen lassen, die den Signalverlauf hinsichtlich der Ablagerungsbildungsvorgänge ausreichend genau beschreiben.

Neben der klassischen Beurteilung der Ablagerungsbildung durch Bauteilbefundung nach dem Betrieb des Motors soll untersucht werden, inwieweit die Erkennung von Ablagerungen in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem auch bereits während des laufenden Motorbetriebs möglich ist. Hierbei steht nicht die Entwicklung eines vollständigen modellbasierten Algorithmus' zur Online-Erkennung von Ablagerungen im Vordergrund, vielmehr soll ermittelt werden, welche Kenngrößen zum Verständnis der Ablagerungsbildungsmechanismen und der Online-Erkennung von Ablagerungen im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem beitragen können. Dabei sollen unterschiedliche Differenzierungsgrade der Ablagerungserkennung betrachtet werden. Diese reichen von der generellen Erkennung von Ablagerungsbildung im Brennraum bis zur detaillierten Beschreibung der durch Ablagerungen hervorgerufenen Änderungen am einzelnen Bauteil. Für diese Untersuchungen sollen die Eingangsgrößen und Einflussfaktoren konstant gehalten werden. Die Zielgrößen sind in Abbildung 29 dargestellt.

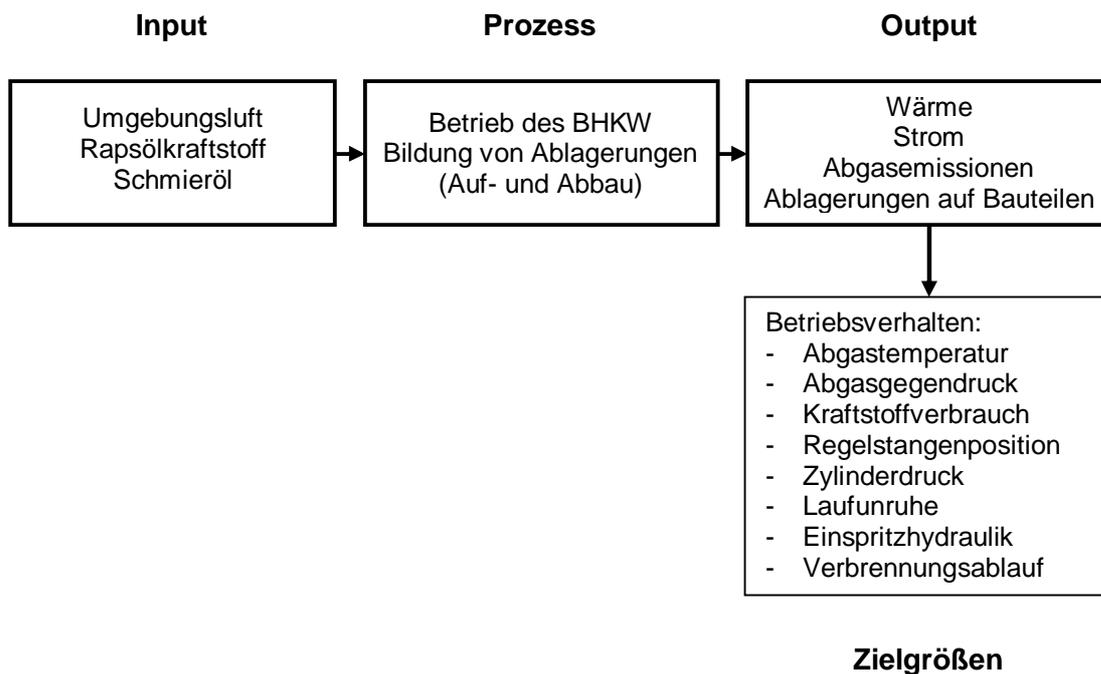


Abbildung 29: Eingangsrößen und Einflussfaktoren sowie Zielgrößen der Untersuchungen – Teil 2

4 Theoretische Überlegungen zur Bildung, Bewertung und Erkennung von Ablagerungen

Zur Bearbeitung der Zielsetzung wird zunächst ein auf dem aktuellen Stand des Wissens basierendes theoretisches Modell zur Ablagerungsbildung erstellt, welches neben Hypothesen zur Ablagerungsbildung auch eine Bewertung der Sensitivität und Relevanz von Ablagerungen an verschiedenen Orten beinhaltet. Dies bildet die Grundlage der in Kapitel 5 beschriebenen experimentellen Arbeit.

Das nachfolgend vorgestellte Modell zur Ablagerungsbildung bei rapsölbetriebenen Motoren orientiert sich an folgenden Leitfragen:

- Wodurch wird die Ablagerungsansammlung beim Betrieb des Motors bestimmt? (Wie kann man die Ablagerungsbildung beeinflussen?)
- Wie schädlich sind die Ablagerungen? (Unterteilung in Primär- und Sekundäreffekte)
- Wie lassen sich Ablagerungen erkennen und differenzieren?

4.1 Thesen zur Bildung von Ablagerungen

Das Modell des Ablagerungsaufbaus beinhaltet folgende Annahmen:

Betriebsstoffe (Kraftstoff und Schmieröl)

Die Betriebsstoffe Kraftstoff und Schmieröl stellen die Ausgangsprodukte zur Bildung von Ablagerungen in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem bereit.

Die Bildung kraftstoffstämmiger Ablagerungen ist direkt abhängig von der Konzentration der Elemente Phosphor, Calcium und Magnesium im Kraftstoff, da diese bei Rapsölkraftstoffen den mit Abstand größten Anteil an ablagerungsbildenden Elementen darstellen.

Die Bildung schmierölstämmiger Ablagerungen folgt prinzipiell den gleichen Mechanismen wie die Bildung kraftstoffstämmiger Ablagerungen. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung eines mineralischen Schmieröls im Vergleich zu einem Pflanzenölkraftstoff stehen jedoch eventuell andere Elemente bei der Ablagerungsbildung im Vordergrund. Zu beachten ist weiterhin, dass der Schmierölverbrauch eines Verbrennungsmotors in der Regel deutlich weniger als 1 % des Kraftstoffverbrauchs beträgt, der Elementgehalt an ablagerungsbildenden Substanzen im Schmieröl jedoch um ein Vielfaches höher als im Kraftstoff sein kann.

Betriebsprofil

Üblicherweise gilt bei Verbrennungsmotoren der Dauerbetrieb als die dem Taktbetrieb zu bevorzugende Betriebsweise, da damit insbesondere verschleißfördernde Startvorgänge und thermischen Stress verursachende Lastsprünge auf ein Minimum reduziert werden können.

Im Hinblick auf den Abbau von Ablagerungen im laufenden Betrieb bietet der Taktbetrieb jedoch Vorteile, da durch die dadurch entstehenden Temperaturspannungen der Abbau von Ablagerungen begünstigt werden kann.

Temperaturniveau

Das Temperaturniveau im Brennraum bzw. auf Oberflächen im Brennraum hat einen Einfluss auf die Ablagerungsansammlung.

Sättigungseffekt

Auch bei einem kontinuierlichen Eintrag von ablagerungsbildenden Elementen in den Motor ist davon auszugehen, dass zumindest im Brennraum ein Sättigungseffekt bei der Ablagerungsansammlung eintritt, obwohl das durch den zur Verfügung stehenden Raum mögliche Ablagerungsvolumen noch nicht erreicht ist.

Dieser These liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Eine Ablagerung kann nur bis zu einer bestimmten Dicke stabil anwachsen. Ist diese Grenzdicke erreicht, brechen weitere Ablagerungen immer wieder ab.
- Ablagerungen wirken isolierend, dadurch sinkt der Temperaturgradient zwischen der Wand und den Verbrennungsgasen. Die Transportmechanismen Thermodiffusion und Thermophorese werden dadurch abgeschwächt, die Ablagerungen bilden sich folglich an anderen Stellen.

Eine durch Laufspiele von sich relativ zueinander bewegenden Teilen begrenzte maximale Dicke der Ablagerungsschicht hat nichts mit einem Sättigungseffekt im Sinne dieser Definition zu tun.

Außerhalb des Brennraums stellt sich dieser Sättigungseffekt nicht mehr zwingend ein, je nach konstruktiver Gestaltung kann in der Abgasanlage von einem kontinuierlichen Anwachsen der Beläge bis zur vollständigen Belegung der Kanalquerschnitte ausgegangen werden.

Reinigungseffekt

Zusätzlich zu Sättigungseffekten kann während des Betriebs eines Verbrennungsmotors auch ein Abbau von Ablagerungen erfolgen. Dieser beginnt, sobald die mechanische Festigkeit dieser Ablagerungsschicht nicht mehr ausreichend ist. Neben dem unterschiedlichen Haftvermögen einzelner Bauteiloberflächen können dabei auch durch wechselnde Oberflächentemperaturen verursachte Spannungen ausschlaggebend sein. Diese hängen sehr stark von dem jeweiligen Betriebsprofil eines Motors ab.

Eine weitere sehr große Rolle bei der Selbstreinigung insbesondere an der Einspritzdüse spielen durch den Kraftstoffstrahl abgetragene Ablagerungen. Die „hydraulische Reinigung“ von Einspritzdüsen ist speziell bei heutigen Einspritzdüsen mit stark ausgeprägter hydroerosiver Verrundung und konischen Spritzlöchern ein auch mit mineralischem Kraftstoff wieder aktuelles Thema, da durch die reduzierten Kavitationseffekte weniger Abtrag von Ablagerungen im Betrieb erfolgt.

Es wird davon ausgegangen, dass kein Reinigungseffekt außerhalb des Brennraums auftritt.

4.2 Thesen zu Auswirkungen von Ablagerungen

Eine weitergehende Betrachtung widmet sich den Primär- und Sekundäreffekten von Ablagerungen sowie deren motorischer Relevanz. Die wichtigsten Primär- und Sekundäreffekte sind nachfolgend aufgeführt, deren Erkennung ist mit entsprechender Messtechnik während des Betriebs möglich.

Primäreffekte

Ablagerungsbildung führt zu einem veränderten Betriebs- und Emissionsverhalten, welches hauptsächlich durch folgende Primäreffekte verursacht wird:

- Beeinträchtigung der Kraftstoffzerstäubung, dadurch unvollständige und teilweise verschleppte Verbrennung
- Reduzierung des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse, dadurch Verlängerung der Einspritzdauer und Verschleppung der Verbrennung
- Veränderung des Verdichtungsverhältnisses, dadurch Änderung des Druckverlaufs während der Kompressionsphase und eventuell Beeinflussung des Verbrennungsablaufs
- Beeinträchtigung der Dichtheit von Ventilen, dadurch Gasleckagen insbesondere während des Verdichtungs- und Arbeitstakts
- Störung der Zylinderinnenströmung durch Ablagerungen auf Ventilen und Kolben, dadurch Beeinträchtigung der Gemischbildung
- Ablagerungsansammlung im Partikelfilter, dadurch Anstieg des Abgasgedrucks und Beeinträchtigung des Ladungswechsels
- Desaktivierung katalytischer Beschichtungen

Neben diesen Einzeleffekten führen hochdynamische Bildungs- und Abbauvorgänge von Ablagerungen zu einer Zunahme der Laufunruhe (Leistungs- und Drehzahlschwankungen).

Diese Primäreffekte lassen sich bei laufendem Motor sowohl durch Betrachtung absoluter Kenngrößen einzelner Arbeitsspiele als auch durch den relativen Vergleich mehrerer Arbeitsspiele erfassen.

Sekundäreffekte

Eine durch Primäreffekte der Ablagerungsbildung verursachte unvollständige Verbrennung kann ihrerseits wiederum zu zunehmender Ablagerungsbildung im Bereich der Kolbenringe führen. Werden diese dadurch in ihrer Freigängigkeit behindert, sind erhöhter Blow-By-Volumenstrom, verringerter Kurbelhausunterdruck sowie im Extremfall Bruch des Kolbenrings die Folge.

Die schlechtere Zerstäubung des Kraftstoffs (aufgrund von Ablagerungen an der Einspritzdüse) hat eine schlechtere Gemischaufbereitung und dadurch einen erhöhten Eintrag von Kraftstoff über die Kolbenringe in die Schmierölwanne zur Folge. Dies kann beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff zur Polymerisation des Schmieröls führen.

Sekundäreffekte sind nur teilweise bei laufendem Motor zu erkennen. Eine differenzierte Beurteilung erfordert in der Regel eine Bauteilanalyse des zerlegten Motors bzw. laborchemische Untersuchungen (z. B. Schmierölanalyse).

Bewertung der motorischen Relevanz von Ablagerungen

Der Bedeutung einzelner, nach dem Ort der Ablagerungsbildung gruppierter, Primäreffekte für die Betriebssicherheit eines Motors setzt sich aus der Wahrscheinlichkeit der Ablagerungsbildung und deren motorischer Auswirkung zusammen.

Die Wahrscheinlichkeit wird nachfolgend als Sensitivität bezeichnet, die motorischen Auswirkungen als Relevanz. Anhand des Zusammenhangs zwischen Sensitivität und Relevanz kann eine Gewichtung der Primäreffekte und deren Einflussgrößen vorgenommen werden.

Auf Basis der Literaturstudie erfolgt eine erste grobe Einstufung der Sensitivität und Relevanz verschiedener Primäreffekte (Tabelle 6). Diese Bewertung dient als Orientierung bei der Definition des Versuchsprogramms. Aufgrund der in der Literatur dargestellten großen Bedeutung der Kraftstoffzerstäubung wird die Einspritzdüse getrennt vom übrigen Brennraum bewertet.

Aus den in Kapitel 4.1 prognostizierten Einflussfaktoren auf die Ablagerungsbildung werden für diese Bewertung nur diejenigen ausgewählt, welche sich beim Betrieb eines Motors direkt beeinflussen lassen. Aufgrund der vergleichbaren Wirkmechanismen werden weiterhin die Faktoren „Kraftstoff“ und „Schmierstoff“ gemeinsam betrachtet.

Bei der Beurteilung der Auswirkungen von Ablagerungsbildung auf den Partikelfilter wird die Beladung durch Rußpartikel nicht berücksichtigt, da diese Art der Ablagerungen normaler Bestandteil des Betriebs eines Dieselmotors sind und in der Regel durch geeignete Maßnahmen zyklisch oder kontinuierlich abgebaut werden.

Tabelle 6: Beurteilung von Sensitivität und Relevanz von Ablagerungen (1)

		Sensitivität (Σ je Primäreffekt = 100)			Relevanz ($\Sigma = 100$)
		Kraftstoff, Schmierstoff	Temperatur- niveau	Betriebsprofil	
Primäreffekte	Brennraum	60	20	20	10
	Einspritzdüse	50	20	30	50
	Partikelfilter	80	10	10	40

Aus dieser Bewertung abgeleitet ergibt sich folgende Relevanz der Ablagerungsorte und Effekte:

	Gewichtung
Priorität 1: Einfluss des Kraft-/Schmierstoffs auf Partikelfilter	80 * 40 = 3200
Priorität 2: Einfluss des Kraft-/Schmierstoffs auf Einspritzdüse	50 * 50 = 2500
Priorität 3: Einfluss des Betriebsprofils auf Einspritzdüse	30 * 50 = 1500
Priorität 4: Einfluss des Temperaturniveaus auf Einspritzdüse	20 * 50 = 1000
Priorität 5: Einfluss des Kraft-/Schmierstoffs auf Brennraum	60 * 10 = 600
etc.	

Diese Priorisierung liefert die Basis für das in Kapitel 5.3 vorgestellte Versuchsprogramm.

4.3 Thesen zur Erkennung und Differenzierung von Ablagerungen

Zur zielgerichteten Erkennung und Differenzierung von Ablagen ist es erforderlich, die zu erwartenden Auswirkungen zu kennen. Abbildung 30 zeigt die anhand der Literaturstudie angenommenen Wirkketten von Ablagerungen an der Einspritzdüse und im Partikelfilter. Auf eine Darstellung der Wirkzusammenhänge allgemeiner Brennraumablagerungen wird aufgrund ihrer als gering eingestuften Relevanz (siehe Kapitel 4.2) verzichtet.

Diese Annahmen bilden die Grundlage für die in Kapitel 5.1 beschriebene Messtechnik am Prüfstand sowie die in Kapitel 5.4 erläuterten Auswertungsverfahren. Im Rahmen der Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung (Kapitel 5.3.4) erfolgt auf Basis der dargestellten Wirkketten eine weitere Differenzierung.

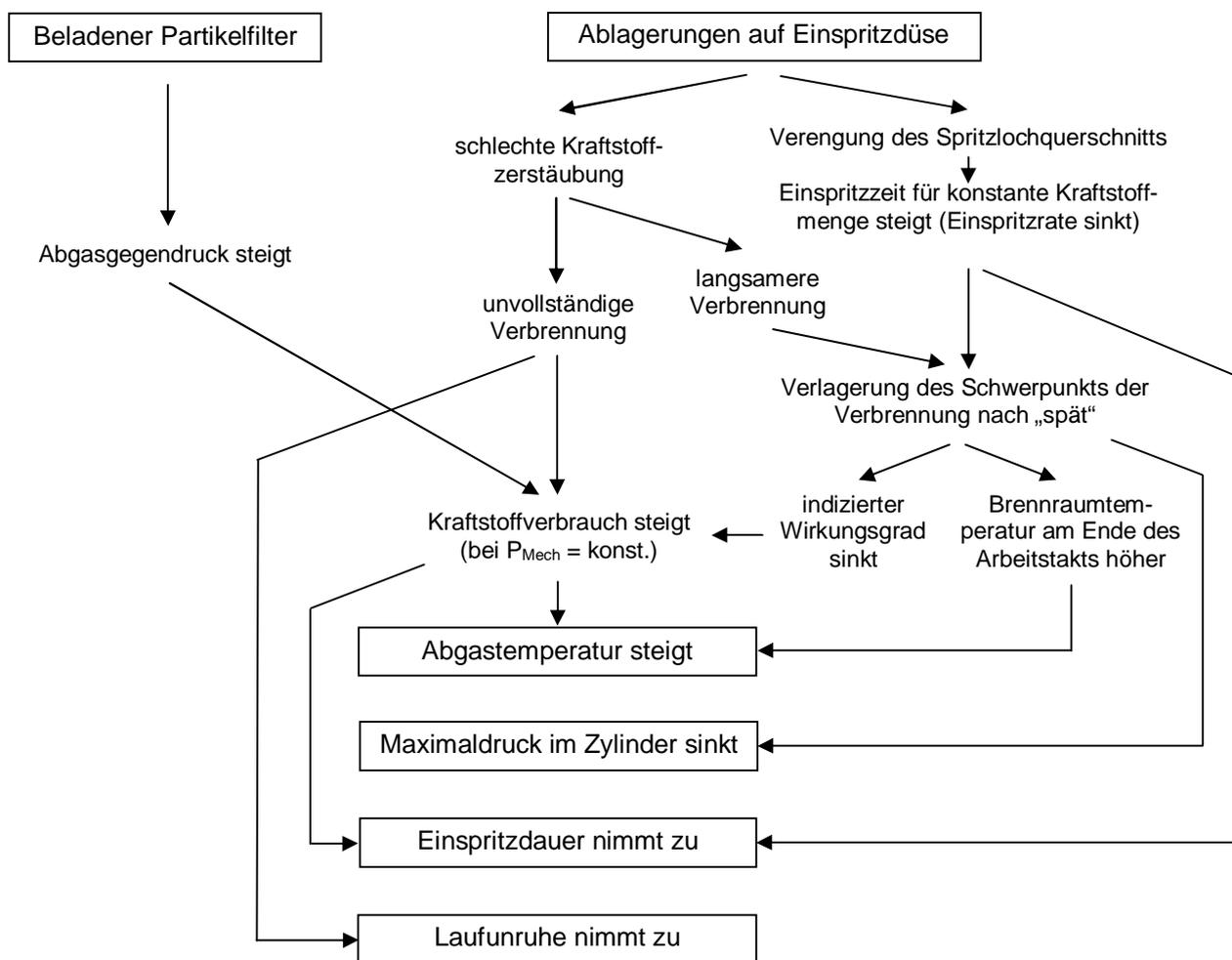


Abbildung 30: Wirkketten von Ablagerungen an der Einspritzdüse und im Partikelfilter

5 Experimentelle Untersuchungen zur Verifikation des theoretischen Modells

Die Verifikation des theoretischen Modells zur Ablagerungsbildung erfolgt mit Hilfe der nachfolgend vorgestellten Experimente. Ziel der Versuche ist es, die in Kapitel 4.2 identifizierten wichtigsten Ablagerungsarten zu erkennen und teilweise auch zu quantifizieren.

Bei der Erkennung und Quantifizierung von Ablagerungen muss grundsätzlich zwischen der direkten Erfassung und der indirekten Erfassung der Ablagerung unterschieden werden.

Eine direkte Erfassung einer Ablagerungsbildung ist z. B. die gravimetrische Erfassung der im Partikelfilter angesammelten Ablagerungen durch Wiegen vor und nach einer bestimmten Betriebszeit oder die Bestimmung der Schichtdicke von Ablagerungen auf Kolben, Ventilen oder Einspritzdüsen. Vorteil der direkten Erfassung ist die Möglichkeit zur hochgenauen Quantifizierung von Bauteilablagerungen nach einem Prüflauf. Allen entsprechenden Verfahren ist gemein, dass eine Erfassung der Ablagerung während des Motorbetriebs auf diese Art nicht möglich ist.

Aus diesem Grund werden neben Versuchsreihen zu den Einzeleinflüssen von Kraftstoff, Betriebsprofil und Bauteiltemperatur weiterführende Untersuchungen zur Erfassung der Ablagerungsbildung während eines Prüflaufs durchgeführt. Das hierfür durchgeführte Versuchsprogramm, die dabei eingesetzten Kraftstoffe, der verwendete Prüfstand sowie die angewendeten Auswertungs- und Beurteilungsverfahren sind in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

5.1 Versuchsprüfstand

Die Untersuchungen zur Ablagerungsbildung wurden an einem BHKW-Prüfstand mit zwei baugleichen BHKW Typ „Dachs RS“ der Fa. SenerTec GmbH durchgeführt. Der BHKW-Typ „Dachs RS“ ist für die Verwendung von Rapsölkraftstoff freigegeben, welcher der DIN V 51605 sowie einer SenerTec-eigenen Spezifikation entspricht. Die technischen Daten der BHKW sind in Tabelle 7 zusammengefasst, Abbildung 31 zeigt den Prüfstandsaufbau.

Über den BHKW-Regler sowie eine übergeordnete Prüfstandssteuerung ist der Betrieb mit einer Generatorleistung zwischen 2,7 kW und 5,3 kW möglich. Gleichzeitig können verschiedene Betriebsprofile (Dauerlauf, Taktbetrieb) programmiert und vollautomatisch gefahren werden.

Die Kühlung der BHKW erfolgt über einen zweiten Kühlwasserkreislauf mit Außenkühler, welcher über Plattenwärmetauscher mit den Kühlkreisläufen der beiden BHKW verbunden ist. Über einen Rücklaufmischer können unabhängig von der Leistungsabgabe der BHKW und der Außentemperatur konstante Kühlwassereintrittstemperaturen eingestellt werden.

Tabelle 7: Technische Daten der BHKW

Motorausführung	Einzylinder-4-Takt-Hubkolbenmotor, liegend, Monoblockbauweise
Brennverfahren	Direkteinspritzung, Luftverteilung
Hubraum	578 cm ³
Hub	91 mm
Bohrung	90 mm
Drehzahlbereich	ca. 1000 min ⁻¹ bis max. 2500 min ⁻¹
Nenn Drehzahl	2450 min ⁻¹
Nennleistung	5,9 kW
Verdichtung	19,5
Spritzbeginn (statisch)	9° KW vor OT
Einspritzpumpe	Bosch PFE 1 A S3000
Einspritzdüse	Bosch DSLA
Düsenhalter	Bosch KBAL
Partikelfilter ¹⁾	NGK HONEYCERAM [®] , Ø 118,4 mm, l 127,0 mm, 100 cpsi

1) Bei einem Teil der Prüfläufe wurde der Partikelfilter durch einen unbeschichteten Katalysatorträger ersetzt, um einen konstanten Abgasgedruck zu gewährleisten.



Abbildung 31: BHKW-Prüfstands Aufbau

Die am Prüfstand eingesetzte Messtechnik gliedert sich in vier Hauptgruppen:

1.) Messdatenerfassung über BHKW-Regler „MSR2“

- Drehzahl
- Generatorleistung
- Kühlwassereintrittstemperatur
- Kühlwasseraustrittstemperatur
- Kurbelhausdruck
- Abgasgegendruck Motoraustritt
- Differenzdruck über DPF und Abgaswärmetauscher
- Schmieröltemperatur
- Kraftstofftemperatur
- Abgastemperatur
- Raumtemperatur
- Saugrohrtemperatur
- Abgastemperatur nach DPF und Abgaswärmetauscher
- Position ESP-Regelstange
- Kraftstoffverbrauch
- Umgebungsdruck

2.) Indiziersystem „AVL 619 Indimeter“

- Kurbelwinkel
- Zylinderdruck
- Einspritzleitungsdruck
- Nadelhub Einspritzdüse

3.) Emissionsmesstechnik „Semtech-D“

- CO
- THC
- NO
- NO₂
- CO₂
- O₂
- Umgebungstemperatur
- Umgebungsluftdruck
- relative Feuchte

4.) sonstige Messwerte

- Blow-By-Volumenstrom
- Schmierölstand
- Masse DPF
- Temperatur Einspritzdüsen spitze
- Temperatur Einspritzdüsen schaft

In Anhang A sind die mit den jeweiligen Messsystemen aufgenommenen Größen im Detail beschrieben. Für die Auswertung der einzelnen Prüfläufe werden nur ausgewählte Messgrößen verwendet, die Aufzeichnungen weiterer Größen dienen als Kontrollgrößen, um unerwünschte Quereinflüsse erkennen zu können. Die Erfassung und Aufzeichnung über den BHKW-Regler erfolgt für alle Prüfläufe kontinuierlich (Aufzeichnungsrate 1 Hz), das Indiziersystem sowie die Emissionsmesstechnik werden nur bei ausgewählten Untersuchungen eingesetzt.

Wie in Kapitel 4.3 gezeigt, ist es mittels der Abgastemperatur möglich, Ablagerungsvorgänge an allen relevanten Stellen des Motorsystems zu erfassen. Dazu muss diese Größe jedoch konti-

nauerlich aufgezeichnet werden, wie der Vergleich in Abbildung 32 zeigt. Dargestellt ist der kontinuierlich gemessene Verlauf der Abgastemperatur eines Dauerlauf-Prüflaufs des BHKW beim Betrieb mit RÖK 4. Zusätzlich sind die über einer 15-minütigen Emissionsmessung (einmal pro Werktag) gemittelten Abgastemperaturen als einzelne Messpunkte aufgetragen. Diese Messpunkte stehen stellvertretend für Messdaten, die bei einer nicht-kontinuierlichen Aufzeichnung zur Auswertung verfügbar sind.

Die in dem Diagramm erkennbaren Ausschläge der Abgastemperatur nach oben kennzeichnen die DPF-Regenerationsphasen, die Ausschläge der Abgastemperatur nach unten kennzeichnen kurze Stillstandsphasen des BHKWs, z. B. durch die tägliche Abschaltung zur Überprüfung der sicherheitsrelevanten Überwachungsfunktionen.

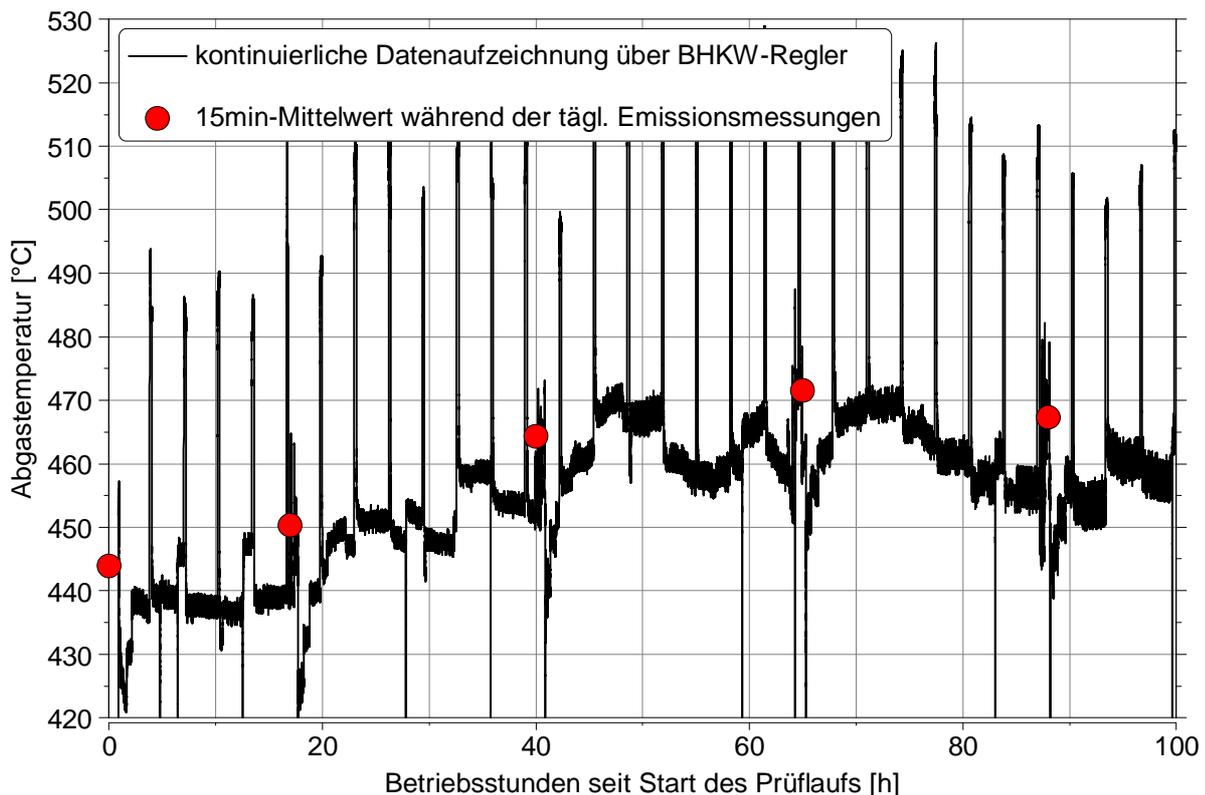


Abbildung 32: Vergleich des Verlaufs von kontinuierlich und in Intervallen gemessener Abgastemperatur beim Betrieb von BHKW 1 mit RÖK 4

In der Abbildung ist weiterhin zu erkennen, dass die Abgastemperatur während der täglichen Emissionsmessungen um ca. 10 K höher ist als während der übrigen Versuchszeit. Dies ist der kompakten Bauweise der Einheit aus Motor und Abgaswärmetauscher geschuldet. Dadurch liegt der Entnahmekanal für Rohabgas koaxial um die Messstelle der Abgastemperatur. Bei gleichzeitiger Messung der Rohemissionen beeinflussen die geänderten Strömungsverhältnisse die Temperaturmessung. Dies wird bei der Auswertung insofern berücksichtigt, dass jeweils nur Messwerte gleichen Zustands der Rohabgasentnahme miteinander verglichen werden. In den dargestellten Diagrammen ist dieser Einfluss jedoch teilweise als Temperatursprung zu erkennen.

Ein Vergleich des Verlaufs der kontinuierlich aufgezeichneten Messdaten mit den täglich gemessenen 15-Minuten-Mittelwerten zeigt, dass die bei starker Ablagerungsbildung auftretende stetige Zu- und Abnahme des Messsignals nur mittels kontinuierlich aufzeichnender Messtechnik erfasst werden kann. Eine ausschließliche Signalbetrachtung und -auswertung in Intervallen ermöglicht keine Aussage zu diesen – vermutlich den Ablagerungsauf- und -abbau beschreibenden – Vorgängen.

Um den Verlauf der Ablagerungsbildung auch anhand von direkt die Verbrennung beschreibenden Messgrößen genau beobachten zu können, sind zusätzlich Untersuchungen mit kontinuierlicher Indizierung erforderlich. Dazu wird die Datenaufzeichnung durch das Indiziersystem so eingestellt, dass – abweichend von den für Dieselmotoren üblichen 50 Arbeitsspielen pro Indiziermessung – nur 20 Arbeitsspiele pro Messdurchlauf aufgezeichnet und anschließend sowohl die Einzelzyklen als auch der Mittelwert der Rohdaten und der berechneten Resultatwerte gespeichert werden.

Die Mittelung über 20 Arbeitsspiele entspricht bei der Motordrehzahl von 2450 min^{-1} ungefähr einer Messdauer von 1 s, wodurch eine annähernd gleiche Zeitbasis wie bei den beiden anderen Erfassungssystemen am Prüfstand erreicht wird. Aufgrund der gleichmäßigeren Verbrennung eines Dieselmotors im Vergleich zu einem Ottomotor erscheint die gewählte Reduzierung der Arbeitsspiele vertretbar. Bedingt durch die zur Berechnung der Mittelwerte und der Resultatwerte erforderliche Rechenzeit steht mit dieser Methode ca. alle 3 s ein Datensatz zur Verfügung.

Die Synchronisierung der verschiedenen Datenquellen erfolgt mittels zweier Verfahren. Zwischen der Messdatenerfassung des Prüfstands und dem Emissionsmessgerät werden die Daten mittels eines Synchronisationssignals synchronisiert, welches während der Aufzeichnung zeitgleiche Impulse an beide Erfassungseinheiten sendet. Bei der Datenauswertung werden die Messdaten aus diesen beiden Quellen zunächst auf Aufzeichnungsunterbrechungen überprüft und anschließend anhand des Synchronisationssignals zeitlich zueinander zugeordnet. Die anschließende Zuordnung der Indizierdaten erfolgt zunächst über den Zeitstempel der aufgezeichneten Daten. Anschließend erfolgt eine Plausibilitätskontrolle der Synchronisation. Dazu werden in den Daten der Messdatenerfassung und den Daten des Indiziersystems Sprungereignisse gesucht, welche nach Zeitpunkt und Dauer verglichen werden.

Für Voruntersuchungen zum Einfluss konstruktiver Maßnahmen auf die Temperatur an der Einspritzdüsen Spitze werden Düsenhalterkombinationen mit Thermoelementen an der Einspritzdüse ausgerüstet (siehe Tabelle 8). Die Düsenhalter unterscheiden sich hinsichtlich Anzahl und Position der Temperaturmessstellen.

Tabelle 8: Beschreibung der Temperaturmessstellen an den Düsenhalterkombinationen

	Düsenhalterkombination	
	Bosch	FEV
Thermoelement	NiCr-Ni	NiCr-Ni
Position Messstelle 1 (Abstand von Düsen Spitze)	5 mm	5 mm
Position Messstelle 2 (Abstand von Düsen Spitze)	-	35 mm

Durch die zwei Messstellen bei DHK Typ „FEV“ kann zusätzlich zur Temperatur an der Düsen Spitze auch die Richtung des Wärmestroms von bzw. zur Düsen Spitze untersucht werden.

Vergleichende Messreihen mit den beiden DHK-Typen zeigen, dass mit der DHK „FEV“ im Vergleich zur DHK „Bosch“ generell ca. 8 K niedrigere Temperaturen an der Düsen Spitze gemessen werden. Dies ist vermutlich in der unterschiedlichen Anordnung der Messstelle 1 entlang des Düsenumfangs begründet. Bei DHK „FEV“ liegt die Messstelle auf der Position des Spritzlochs 3 („oben“), und ragt damit weniger weit in den Brennraum als die entsprechende Messstelle der DHK „Bosch“, welche zwischen Spritzloch 3 und 4 liegt.

5.2 Betriebsstoffe

Wie in der Literaturstudie gezeigt, können Ablagerungen in Verbrennungsmotoren grundsätzlich kraftstoff- oder schmierölstämmig sein. Daher müssen für entsprechende Untersuchungen die für Ablagerungsbildung relevanten Eigenschaften beider Betriebsstoffe bekannt sein. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

5.2.1 Kraftstoffe

Aufgrund des Ausgangsmaterials (Rapssaat) und des Herstellungsprozesses (Pressung, gegebenenfalls anschließende Raffination) von Rapsölkraftstoff gelten Phosphor, Calcium und Magnesium als die drei Elemente, welche bei Verwendung eines derartigen Kraftstoffs hauptsächlich für die Bildung von Ablagerungen verantwortlich sind. Um für die Untersuchungen möglichst realitätsnahe Kraftstoffzusammensetzungen zu erhalten, wird auf eine nachträgliche Dotierung mit aschebildenden Substanzen verzichtet. Stattdessen werden die unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten durch gezielte Wahl des Ölgewinnungsverfahrens und der Prozessparameter hergestellt. Tabelle 9 zeigt die variablen Eigenschaften der fünf eingesetzten Kraftstoffe.

Tabelle 9: Variable Kraftstoffeigenschaften der eingesetzten Rapsölkraftstoffe

	Gesamtverschmutzung [mg/kg]	Säurezahl [mg KOH/g]	Oxidationsstabilität (110°C) [h]	Phosphorgehalt [mg/kg]	Summengehalt Calcium + Magnesium [mg/kg]	Aschegehalt (Oxidasche) [% (m/m)]	Wassergehalt [mg/kg]	Herstellungsverfahren
RÖK 1	3,5	0,027	9,1	< 0,5	< 0,5	0,001	99	Vollraffinat
RÖK 2	5,0	0,780	8,6	9,5	12,3	0,002	644	Kaltpressung, entschleimt
RÖK 3	5,5	0,780	8,3	14,9	15,9	0,001	617	Kaltpressung, entschleimt
RÖK 4	19,0	0,970	10,1	22,6	19,2	0,003	691	Kaltpressung, nicht entschleimt
RÖK 5	13,0	2,094	9,4	91,9	78,0	0,033	519	Warmpressung, nicht entschleimt

Im Vergleich zu den Grenzwerten der DIN V 51605 liegen RÖK 3 bis RÖK 5 hinsichtlich der gewählten Konzentrationen an Phosphor, Calcium und Magnesium außerhalb der Norm. Marktuntersuchungen zeigen jedoch, dass zumindest die von den Kraftstoffen RÖK 1 bis RÖK 4 abgedeckte Bandbreite durchaus am Markt vorkommen kann. Für RÖK 5 werden bewusst sehr hohe Elementkonzentrationen gewählt, um beschleunigte Effekte erzielen zu können. Der sehr aschearme Kraftstoff RÖK 1 wird als Einfahrkraftstoff für sämtliche Versuchsreihen verwendet.

5.2.2 Schmieröl

Für die Untersuchungen wird ausschließlich ein vom Hersteller des BHKW freigegebenes Schmieröl eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein für den Betrieb von Heizöl-BHKW mit Partikelfilter optimiertes aschearmes Öl. In Tabelle 10 sind die Elementgehalte des eingesetzten Schmieröls dargestellt.

Tabelle 10: Elementgehalte des eingesetzten Schmieröls

Element	Konzentration
Calcium	2050 mg/kg
Magnesium	10 mg/kg
Bor	5 mg/kg
Zink	285 mg/kg
Phosphor	294 mg/kg
Schwefel	3762 mg/kg

5.3 Versuchsprogramm

Zur Verifizierung der Thesen zur Ablagerungsbildung und -erkennung werden die folgenden Versuchsreihen durchgeführt:

- Langzeitprüfläufe (Variation von Kraftstoff und Betriebsprofil)
- Prüfläufe zur Untersuchung des Einflusses des Betriebsprofils
- Prüfläufe zur Untersuchung des Einflusses des Temperaturniveaus
- Prüfläufe zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung

Die Langzeitprüfläufe stellen dabei die Grundlage für weitere Untersuchungen dar. Aufbauend auf deren Ergebnissen finden vertiefende Untersuchungen zum Einfluss des Betriebsprofils und des Temperaturniveaus an der Einspritzdüse statt. Den Abschluss bilden Versuchsreihen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung im laufenden Motorbetrieb.

Die jeweiligen Prüfläufe unterscheiden sich hinsichtlich der untersuchten Einflussfaktoren und der eingesetzten Auswertungsmethoden. Tabelle 11 zeigt diese Struktur im Überblick. Weitere Unterschiede bestehen zwischen der Dauer der jeweiligen Prüfläufe, der eingesetzten Kraftstoffe, des verwendeten Prüfstands und der ausgewerteten Messgrößen. Diese Parameter sind in den nachfolgenden Unterkapiteln jeweils im Detail beschrieben.

Tabelle 11: Übersicht über das Versuchsprogramm

	Einflussfaktoren auf die Bildung von Ablagerungen					Auswertungsmethoden			
	Betriebsstoffe	Betriebsprofil	Temperaturniveau	Sättigungseffekte	Reinigungseffekte	Betriebsverhalten	Betriebsverhalten (zeitl. hoch aufgelöst)	Emissionsverhalten	Bauteilbefundung
Langzeitprüfläufe	X	X	X			X		X	X
Vertiefung Einfluss Betriebsprofil		X		X	X	X			
Vertiefung Einfluss Temperaturniveau			X	X	X	X			
Online-Erkennung von Ablagerungsbildung				X	X		X		

Um wiederholbare Ausgangsbedingungen zu schaffen sowie an gelaufenen Bauteilen eine detaillierte Befundung durchführen zu können, wird der BHKW-Motor nach jedem Prüflauf zerlegt und gereinigt und mit neuem Kolben, neuen Ventilen, einer neuen Einspritzdüse sowie einem neuen Partikelfilter aufgebaut.

Vor Beginn eines neuen Prüflaufs folgt eine Einlaufphase über 50 Betriebsstunden mit Rapsölvollraffinat (RÖK 1). Nach Ablauf der Einlaufphase erfolgt ein Wechsel von Schmieröl und -filter, um eventuell im Öl vorhandene Abriebstoffe zu entfernen. Zusätzlich wird der Brennraum endoskopisch untersucht, um den Ausgangszustand zu dokumentieren. Die Messdatenerfassung erfolgt bereits in der Einlaufphase entsprechend dem sich anschließenden Versuchsprogramm, so dass eine exakte Beurteilung des Einlaufverhaltens möglich ist. Der Prüflauf wird nur dann durchgeführt, wenn anhand der erhobenen Daten und der endoskopischen Untersuchung keine Ablagerungsbildung beobachtet werden kann.

Der Neuaufbau des Motors und der Messtechnik vor jedem Prüflauf birgt durch Bauteil- oder Montagetoleranzen das Risiko, dass das Absolutniveau einzelner Messwerte zwischen den neu aufgebauten Motoren unterschiedlich ist. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Diskussion der Versuchsergebnisse (Kapitel 8) jeweils die Änderung einer Messgröße über die Dauer des Prüflaufs ausgewertet, nicht deren Absolutwert.

5.3.1 Untersuchungen zum Einfluss des Kraftstoffs

In den Langzeituntersuchungen zum Einfluss des Kraftstoffs werden beide BHKW mit den vier Kraftstoffen RÖK 1 bis RÖK 4 (siehe Kapitel 5.2.1) für jeweils 250 Betriebsstunden mit den Betriebsprofilen „Dauerlauf“ und „Takt 1/1“ (eine Stunde Betrieb, eine Stunde Pause) betrieben. Die jeweiligen Kombinationen und die dazu auszuwertenden Messgrößen sind in Tabelle 12 dargestellt.

Ziel der Untersuchungen ist es, grundsätzliche Unterschiede zwischen den Auswirkungen der einzelnen Kraftstoffe auf das Betriebsverhalten des Motors zu untersuchen sowie eine ausreichende Menge an Ablagerungen als Basis für Bauteilbeurteilungen zu generieren. Diese sollen unter anderem auch hinsichtlich des Einflusses lokaler Oberflächentemperaturen auf die

Ablagerungsbildung ausgewertet werden. Anhand des Vergleichs von Dauerlauf und Taktbetrieb soll eine erste Abschätzung zum Einfluss des Betriebsprofils erfolgen.

Tabelle 12: Übersicht über die Langzeitprüfläufe

	Prüfstand		Kraftstoff				Betriebsprofil		Ausgewertete Messgrößen							
	BHKW 1	BHKW 2	RÖK 1	RÖK 2	RÖK 3	RÖK 4	Dauerlauf	Takt 1/1	Abgastemperatur	Differenzdruck DPF	Emissionen	DPF (Masse)	Einspritzdüse	Kolben	Ventile	Brennraumdecke
L1	X		X				X		X	X	X	X	X			
L2	X		X					X	X	X	X	X	X	X	X	X
L3	X			X			X		X	X	X	X	X			
L4	X			X				X	X	X	X	X	X	X	X	X
L5	X				X		X		X	X	X	X	X			
L6	X				X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
L7	X					X	X		X	X	X	X	X			
L8	X					X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
L9		X	X				X		X	X	X	X	X			
L10		X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X
L11		X		X			X		X	X	X	X	X			
L12		X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X
L13		X			X		X		X	X	X	X	X			
L14		X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
L15		X				X	X		X	X	X	X	X			
L16		X				X		X	X	X	X	X	X	X	X	X

Pro Kraftstoff wird dabei zunächst der Dauerbetrieb durchgeführt. Nach einer endoskopischen Untersuchung des Brennraums und dem Austausch der Einspritzdüse erfolgt direkt anschließend der Betrieb für weitere 250 Betriebsstunden im Taktbetrieb mit derselben Kraftstoffcharge.

Die Beurteilung der Änderung des Betriebsverhaltens aufgrund von Ablagerungsbildung erfolgt überwiegend anhand der spezifischen Abgastemperatur. Die im Partikelfilter eingelagerte Ablagerungsmasse wird in regelmäßigen Abständen gravimetrisch ermittelt, zusätzlich erfolgt jeweils die Bestimmung des Differenzdrucks über den DPF. Nach Abschluss des jeweiligen Prüflaufs wird der Motor komplett zerlegt, und der Zustand von Brennraum, Kolben, Ventilen und Einspritzdüse befundet. Die entsprechenden Verfahren sind in Kapitel 5.5 beschrieben.

5.3.2 Untersuchungen zum Einfluss des Betriebsprofils

Neben dem bereits im vorherigen Kapitel beschriebenen Vergleich von Dauerlauf und Taktbetrieb im Rahmen der Langzeitprüfläufe werden weitere vertiefende Prüfläufe mit unterschiedlichen Betriebsprofilen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist es insbesondere, die aufgestellten Thesen zum Sättigungs- und Reinigungseffekt zu verifizieren. Tabelle 13 zeigt die Prüfläufe im Überblick.

Tabelle 13: Überblick über die Prüfläufe zur Untersuchung des Einflusses des Betriebsprofils

	Kraftstoff		Betriebsprofil			Ausgew. Messgr.
	RÖK 1	RÖK 5	Dauerlauf	Takt 3/1	Takt 1/1	Abgastemperatur
B1	X		X			X
B2		X	X			X
B3		X		X		X
B4		X		X		X
B5		X			X	X
B6		X			X	X

Zur Verkürzung der Versuchsdauer wird bei diesen Untersuchungen der Kraftstoff RÖK 5 eingesetzt. Dieser hat gegenüber RÖK 4 einen ca. 4-fachen Gehalt an aschebildenden Substanzen.

Die gewählten Betriebsprofile waren:

- Dauerlauf
- Takt 3/1 (drei Stunden Betrieb, eine Stunde Pause)
- Takt 1/1 (eine Stunde Betrieb, eine Stunde Pause)

Während der Stillstandsphasen erfolgt eine thermostatisch gesteuerte Abkühlung der BHKW auf ca. 40 °C Kühlwassertemperatur. Dies entspricht dem „Kaltstart“ eines in ein Heizsystem eingebundenen BHKW.

Die geplante Dauer der Versuchsreihen beträgt maximal 250 Betriebsstunden, sobald jedoch während des Prüflaufs eine Erhöhung der Abgastemperatur auf über 520 °C erfolgt, wird der Motor über die Temperaturüberwachung des BHKW-Reglers automatisch abgeschaltet und der Prüflauf beendet.

Als ausgewählter Indikator für das Ablagerungsverhalten dient wiederum die spezifische Abgastemperatur. Um Einflüsse der Ablagerungsbildung im Abgasnachbehandlungssystem zu minimieren, wird der Partikelfilter durch einen unbeschichteten Katalysatorträger ersetzt. Dadurch kann ein praktisch konstanter Abgasgegendruck über die gesamte Dauer der Prüfläufe sicher gestellt werden.

5.3.3 Untersuchungen zum Einfluss der Variation des Temperaturniveaus

Ziel der Untersuchungen von konstruktiven Maßnahmen zur Variation des Temperaturniveaus ist es, die These zum Einfluss der Bauteiltemperatur auf die Ablagerungsbildung zu verifizieren. Zusätzlich dazu soll auch mit diesen Versuchsreihen überprüft werden, ob Sättigungs- und Reinigungseffekte auftreten und welchen Einfluss konstruktive Maßnahmen darauf ausüben.

Neben der Ablagerungsbildung im Abgasnachbehandlungssystem wird in der Literatur überwiegend die Belagsbildung auf der Einspritzdüse als besonders funktionskritisch genannt. Gleichzeitig ist der Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf dieses Bauteil sehr groß. Aus diesem Grund konzentrieren sich die nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen auf die Änderung der Temperatur der Einspritzdüsen Spitze.

Im Rahmen von Vorversuchen (T_V1 bis T_V4) wird zunächst der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Temperatur an verschiedenen Stellen der Einspritzdüse untersucht. Aufgrund der empfindlichen Messtechnik zur Erfassung der Einspritzdüsentemperatur werden diese Prüfläufe mit RÖK 1 durchgeführt.

Variiert wird dabei

- Motorleistung
- Düsenüberstand in den Brennraum
- Förderbeginn
- Wärmeabfuhr in den Zylinderkopf

Bei der Beurteilung der Vorversuche ist zu beachten, dass eine Änderung des Düsenüberstands oder des Förderbeginns direkten Einfluss auf die Gemischbildung und die Verbrennung nimmt. Die daraus resultierenden erforderlichen Arbeiten zur Neuabstimmung der Verbrennung sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit, weshalb diese Prüfläufe nur die damit erzielbaren Temperaturänderungen aufzeigen sollen.

Die Auswirkungen verschiedener Einspritzdüsentemperaturen auf die Ablagerungsbildung werden in einem zweiten Schritt anhand dreier Varianten mit unterschiedlicher Wärmeabfuhr in den Zylinderkopf untersucht. Dazu wird das BHKW für jeweils 100 Betriebsstunden im Dauerlauf mit RÖK 5 betrieben. Um Einflüsse der Ablagerungsbildung im Abgasnachbehandlungssystem zu minimieren, wird auch für diese Versuchsreihen der DPF durch einen offenen Träger ersetzt, um einen konstanten Abgasgedruck über die gesamte Dauer der Prüfläufe sicher zu stellen. Tabelle 14 zeigt die Prüfläufe im Überblick.

Tabelle 14: Überblick über die Prüfläufe zur Untersuchung des Einflusses des Temperaturniveaus

	Kraftstoff		Varianten Vorversuche				Varianten Hauptversuche (Wärmeabfuhr)			Ausgewertete Messgrößen		
	RÖK 1	RÖK 5	Generatorleistung	Düsenüberstand in den Brennraum	Förderbeginn	Wärmeabfuhr	Düsenhalter isoliert	Düsenhalter Serie	Düsenhalter mit Wärmeleithülse lang	Abgastemperatur	Temperatur Einspritzdüsen Spitze (Bosch)	Temperatur Einspritzdüsen Spitze (FEV)
T_V1	X		X							X		
T_V2	X			X						X		
T_V3	X				X					X		
T_V4	X					X					X	X
T1		X					X		X			
T2		X						X	X			
T3		X					X		X			

Eine Beurteilung des Temperaturminderungspotentials der untersuchten Maßnahmen erfolgt mit speziell instrumentierten Düsenhalterkombinationen (siehe Kapitel 5.1). Zur Auswertung der Auswirkungen unterschiedlicher Einspritzdüsentemperaturen auf die Belagsbildung wird wiederum die spezifische Motorabgastemperatur ausgewertet.

5.3.4 Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungen

Die in den vorangegangenen drei Kapiteln beschriebenen Untersuchungen dienen der Analyse ausgewählter Einflüsse auf die Ablagerungsbildung bei Verbrennungsmotoren. Auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen aufbauend werden verschiedene Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungen untersucht, welche sich nach ihrem Differenzierungsgrad unterscheiden. Mit diesen soll durch indirekte Messungen der Ort der Ablagerung erkannt und der Einfluss der Ablagerung qualifiziert und soweit möglich quantifiziert werden. Um den Transfer der gewonnenen Ergebnisse in die Praxis zu erleichtern, wird bei der Auswahl der betrachteten Messgrößen auch die Serientauglichkeit der jeweiligen Methode berücksichtigt. Abbildung 33 zeigt eine Gliederung der Ablagerungsbildung in unterschiedliche Qualifizierungs- bzw. Quantifizierungsgrade („Ebenen“).

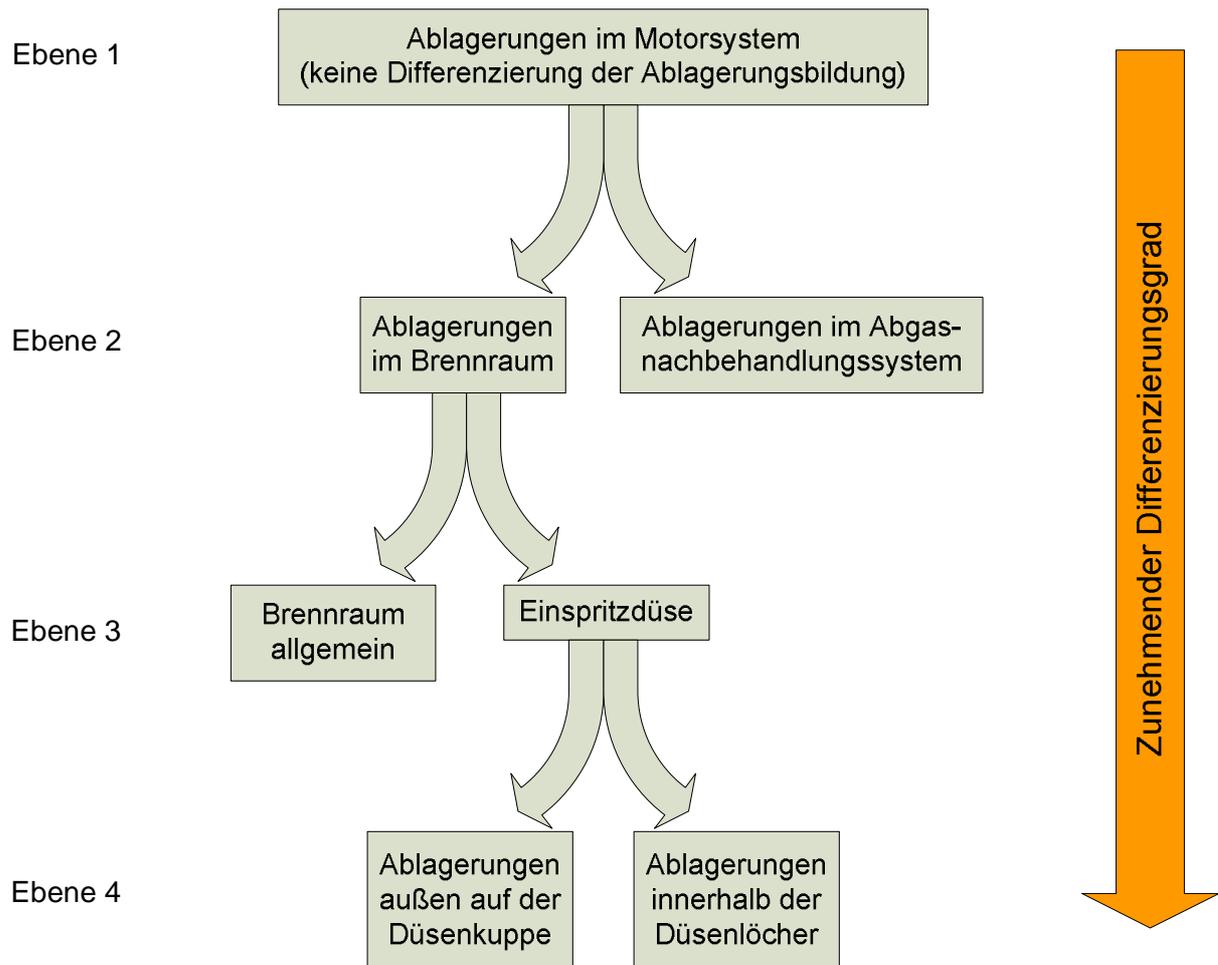


Abbildung 33: Unterschiedliche Differenzierungsgrade bei der Erkennung von Ablagerungen

Der gewünschte Differenzierungsgrad bestimmt die erforderliche Messtechnik. Die Messgrößen, anhand derer Ablagerungsbildung erkannt werden kann, lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- 1) Messgrößen, welche zeitbasiert gemessen werden; z. B. Drücke, Temperaturen, Positionen, Aufzeichnungsrate ca. 1 Hz („langsam“)
- 2) Emissionen, ebenfalls zeitbasiert gemessen; Aufzeichnungsrate ca. 1 Hz
- 3) Maximalwerte von Messgrößen, welche zyklusbasiert gemessen werden (jedoch ohne Zuordnung zum Kurbelwinkel); z. B. maximaler Brennraumdruck, maximaler Druckanstieg (Klopfsensor)
- 4) Zyklusbasierte Ergebniswerte, die kein hochaufgelöstes Kurbelwinkelsignal erfordern (z. B. Einspritzdauer, in °KW oder ms)
- 5) Zyklusbasierte Verlaufswerte (z. B. Zylinderdruckverlauf) sowie daraus berechnete Ergebniswerte, zu deren Berechnung ein hochaufgelöstes Kurbelwinkelsignal erforderlich ist.

Von den oben genannten Verfahren lassen sich aus Kostengründen oder wegen der Lebensdauer der Messtechnik nur die aus den Gruppen 1), 3) und eventuell 4) für die Erkennung von Ablagerungsbildung in Serienanwendungen heranziehen. Im Unterschied zu den Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung im Prüfstandsbetrieb müssen Methoden für die Serienanwendung mit einfacher robuster Messtechnik und einfacheren (schnelleren) Berechnungsalgorithmen realisiert werden können. Dies schließt in der Regel Verfahren aus, welche auf eine sehr exakte Ermittlung des momentanen realen Kraftstoffverbrauchs (z. B. über Waage

bzw. Coriolis-Massenstrommessung) oder ein hochaufgelöstes Kurbelwinkelsignal angewiesen sind. Weiterhin sind Verfahren, welche auf der Messung gas- oder partikelförmiger Emissionen beruhen, zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung in Serienanwendungen nicht geeignet. Dennoch wird parallel zur Betrachtung von serientauglichen Messgrößen untersucht, welcher zusätzliche Differenzierungsgrad durch die Auswertung von Emissionsmessungen und hochaufgelösten kurbelwinkelbasierten Indizierdaten erreichbar ist.

Die nachfolgende Tabelle 15 zeigt, welche Messgrößen für den jeweiligen Detaillierungsgrad zur Beurteilung der Ablagerungsbildung herangezogen werden.

Tabelle 15: mögliche Messgrößen in Abhängigkeit des Detaillierungsgrads

	Detaillierungsgrad	Messgröße
Ebene 1	Ablagerungen im Motorsystem (keine Differenzierung der Ablagerungsbildung)	- Motorabgastemperatur - Kraftstoffverbrauch - Füllungsgrad der Einspritzpumpe (ermittelt über Regelstangenposition)
Ebene 2	Differenzierung in Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem	- Abgasgegendruck - Einzelzylinderabgastemperatur - Maximaldruck im Zylinder
Ebene 3	Differenzierung in Ablagerungen im Brennraum allgemein und Ablagerungen an der Einspritzdüse	- Maximaldruck in der Kompressionsphase - Laufunruhe
Ebene 4	Differenzierung in Ablagerungen außen auf der Einspritzdüsenkuppe sowie innen in der Einspritzdüse	- Hydraulischer Durchfluss der Einspritzdüse - Verbrennungsverzögerung

5.4 Verfahren zur Auswertung der Messdaten

Zur Auswahl einer aussagekräftigen Methode zur Auswertung der Messdaten werden in Voruntersuchungen verschiedene Verfahren untersucht und miteinander verglichen. Ziel ist es, ein Verfahren zu finden, welches den Einfluss von sich ändernden Randparametern über die Dauer eines Prüflaufs bzw. zwischen einzelnen Prüfläufen ausreichend in geeigneter Form kompensiert. Derartige Rahmenbedingungen sind z. B.:

- Änderungen der Umgebungsbedingungen
- Schwankungen des Betriebspunktes
- Bauteil- und Montageteranzen (beim Vergleich verschiedener Prüfläufe untereinander)

Eine Berücksichtigung bzw. Korrektur dieser Einflüsse kann auf verschiedene Arten erfolgen. In Tabelle 16 sind mögliche Verfahren, die im Rahmen dieser Untersuchung zur Anwendung kamen, dargestellt. Aus der Tabelle geht auch hervor, welche Störeinflüsse mit der jeweiligen Korrekturmaßnahme kompensiert werden können. Die einzelnen Verfahren werden in den nachfolgenden Unterkapiteln im Einzelnen vorgestellt und abschließend miteinander verglichen.

Tabelle 16: Verfahren zur Auswertung der Messdaten

	Korrekturverfahren		
	Umgebungsbedingungen	Betriebspunkt	Bauteil-/ Montagetoleranzen
Betriebspunkt allgemein		X	
Spezifische Messgrößen (leistungsbezogen)	(X) ₁	X	
Vergleich Realwert - Idealwert		X	X

1) Je nach Definition können Umgebungsbedingungen teilweise mit korrigiert werden

Ein für Verbrennungsmotoren gültiges Verfahren zur Korrektur von Umgebungsbedingungen ist in der DIN ISO 3046 beschrieben. Hierbei wird die abgegebene reale Motorleistung in Abhängigkeit der Ansaugbedingungen des Motors in eine korrigierte („fiktive“) Motorleistung umgerechnet. [37] Das Verfahren hat beispielsweise bei der Bestimmung der maximalen Motorleistung von Stationärmotoren in Abhängigkeit der Aufstellhöhe große Bedeutung.

Bedingt durch die Aufstellung der BHKW in einem Laborraum und eine raumluftabhängige Luftansaugung können die Umgebungsbedingungen für im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Fragestellungen als ausreichend konstant angenommen werden.

Die für die Untersuchungen eingesetzten BHKW werden während des Betriebs auf eine konstante elektrische Leistung bei praktisch konstanter Drehzahl (netzgekoppelter Asynchrongenerator) geregelt. Dennoch muss für die Berechnung von Idealwerten der momentane Betriebspunkt genau bekannt sein, um Abweichungen vom Idealzustand erfassen zu können. Abweichend zur sonst bei Verbrennungsmotoren üblichen Praxis, den indizierten Mitteldruck als Bezug zu verwenden, wird hierfür die Generatorleistung herangezogen, da diese auch bei Prüfläufen ohne Indiziermesstechnik kontinuierlich mit erfasst wird. Wie Abbildung 34 zeigt, korrelieren beide Größen bei betriebswarmem Motor sehr gut.

Dieser Zusammenhang wird im Rahmen der Auswertungen von Prüfläufen mit kontinuierlicher Indizierung auch dazu genutzt, um zu überprüfen, ob der Motor während der ausgewerteten Zeiträume einen stationären Zustand erreicht, und um die Messreihen auf direkt nicht erfasste Störgrößen zu überprüfen.

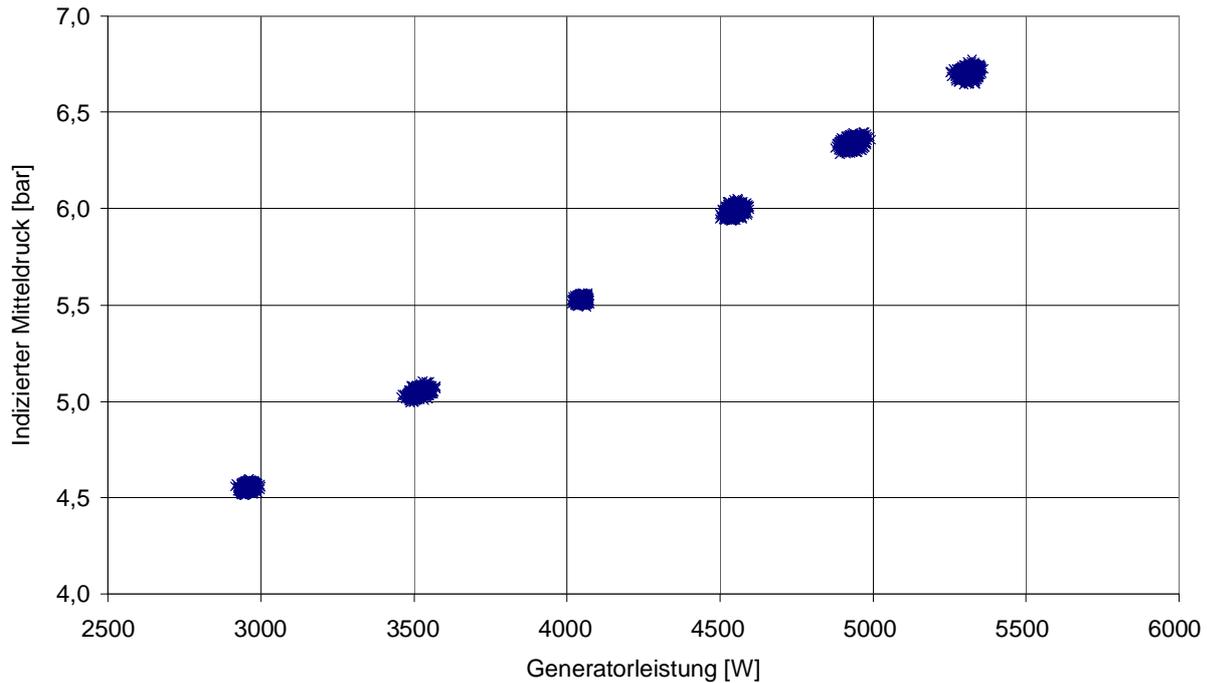


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Generatorleistung und indiziertem Mitteldruck

5.4.1 Korrektur des Betriebspunkts

Die Anlagenregler der untersuchten BHKW regeln im Normalbetrieb auf eine Sollgeneratorleistung von 5000 W mit einer maximal zulässigen Abweichung von ± 140 W. Dieser große Regelbereich wurde vom Hersteller gewählt, um einen möglichst ruhigen „eingriffsarmen“ Motorlauf zu ermöglichen. Für die Laboruntersuchungen bedeutet dies, dass bei gleicher Lastpunktvorgabe Leistungsunterschiede im Bereich von ca. ± 3 % möglich sind, welche sich naturgemäß auf die weiteren Messdaten auswirken.

Um unter diesen Randbedingungen dennoch vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wird zunächst die Abhängigkeit einer Messgröße von der tatsächlichen Generatorleistung bestimmt. Aus der Vielzahl der vorhandenen Messgrößen ist in Abbildung 35 stellvertretend die Abgastemperatur in Abhängigkeit der Leistung dargestellt, da dies die für die Auswertungen relevanteste Messgröße ist. Dazu wurden die einzelnen Leistungsstufen angefahren. Nach Erreichen des Beharrungszustands wird der Mittelwert der jeweiligen Messgröße über 10 Minuten gebildet (600 Messpunkte). Eine Übersicht über den Zusammenhang zwischen der Abgastemperatur und anderen Betriebsgrößen befindet sich in Kapitel 4.3.

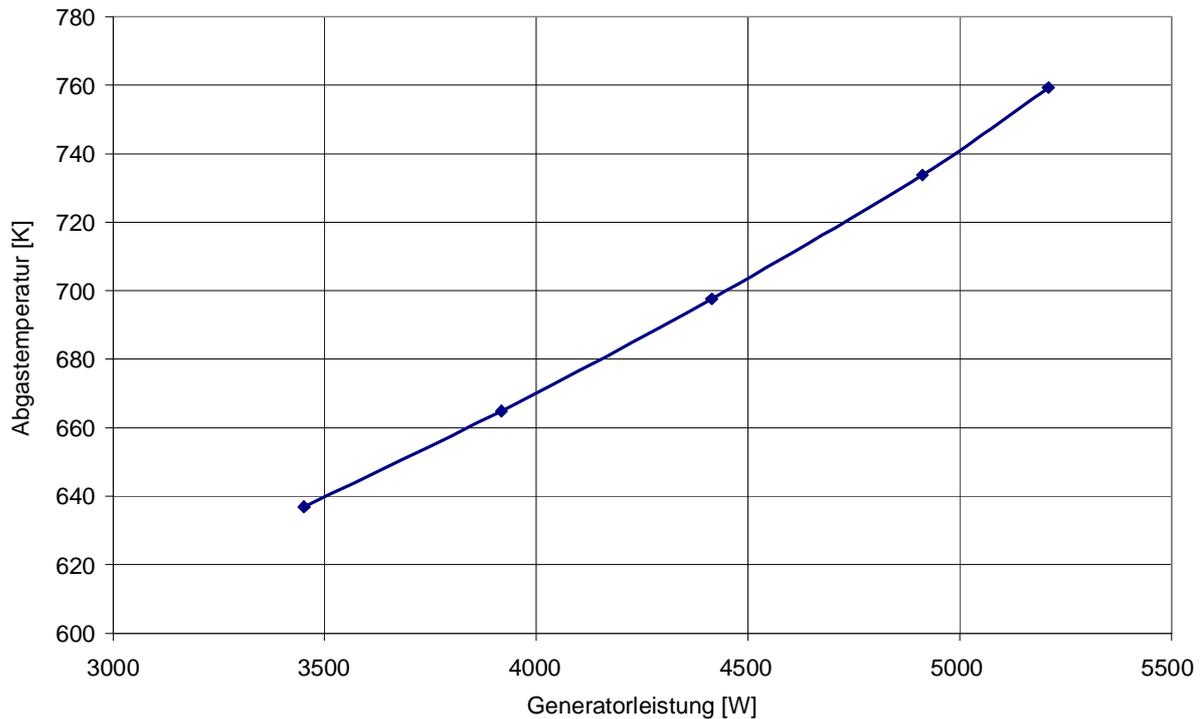


Abbildung 35: Einfluss der Generatorleistung auf die Abgastemperatur

Für den dargestellten Zusammenhang ergibt eine Regressionsanalyse auf Basis eines Polynoms 2. Grades folgenden Zusammenhang:

$$T_{\text{Abgas}} = 8,230 \cdot 10^{-6} \cdot P_{\text{el}}^2 - 2,084 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{el}} + 5,463 \cdot 10^2 \quad (T_{\text{Abgas}} \text{ in K, } P_{\text{el}} \text{ in W})$$

$$\text{Bei } P_{\text{el_soll}} = 5000 \text{ W gilt: } T_{\text{Abgas_soll}} = 741,63 \text{ K}$$

Dieses Verfahren eignet sich auch zur Darstellung weiterer Messgrößen in Abhängigkeit der Generatorleistung, sofern diese ein eindeutiges Trendverhalten zeigen. Je nach Zusammenhang kann es vorteilhaft sein, die Regressionsanalyse auf den Leistungsbereich von 4860 W bis 5140 W zu beschränken, um in diesem relevanten Bereich eine möglichst genaue Abbildung der Abhängigkeit zu erhalten.

In Abbildung 36 ist die generelle Vorgehensweise zur Korrektur des Betriebspunkts anhand zweier zufällig angenommener Messwerte MW1 und MW2 dargestellt. Der Messwert wird dabei um einen Offset korrigiert, der sich aus der Differenz zwischen dem Sollwert bei Referenzleistung und dem Sollwert bei der tatsächlichen Leistung ergibt.

Die Korrektur erfolgt nach den Gleichungen

$$y_{1'} = y_1 + (y(P_{\text{el_soll}}) - y(P_{\text{el_1}})) \quad (1)$$

bzw.

$$y_{2'} = y_2 + (y(P_{\text{el_soll}}) - y(P_{\text{el_2}})) \quad (2)$$

mit: y_n = Messgröße (allgemein)
 $y_{n'}$ = korrigierte Messgröße (allgemein)
 P_{el_n} = elektrische Leistung des Generators
 $P_{\text{el_soll}}$ = elektrische Sollleistung des Generators

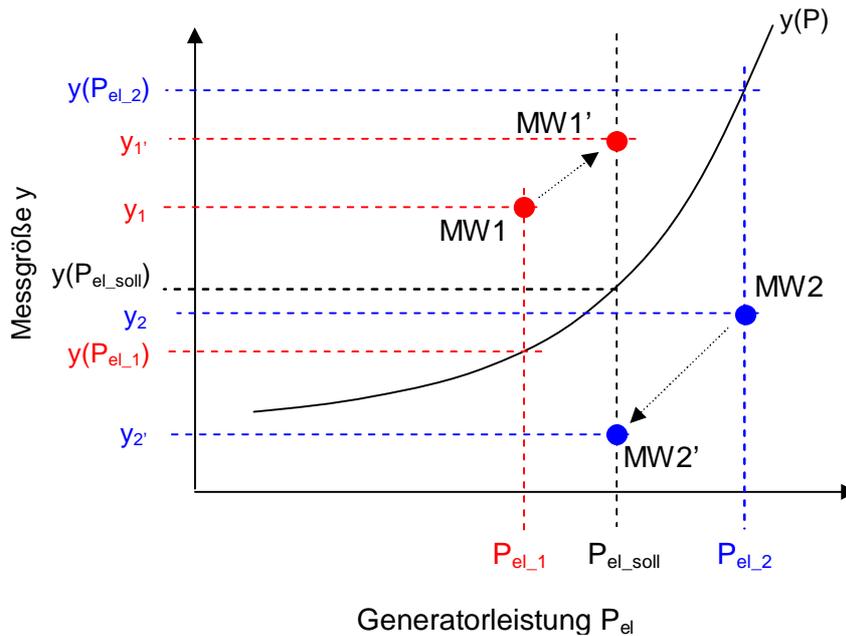


Abbildung 36: Vorgehensweise zur Korrektur des Betriebspunkts (nicht maßstäblich)

Bei den erwarteten kleinen Abweichungen der Messwerte vom Referenzzustand ist diese Vorgehensweise ausreichend genau. Zur Korrektur deutlich größerer Abweichungen des Betriebspunkts sind statt einer Referenzkurve entsprechende Kurvenscharen erforderlich.

Abhängig von der gewünschten zeitlichen Auflösung des korrigierten Signals (beispielsweise im Rahmen der Online-Auswertung des Betriebsverhaltens) kann es erforderlich sein, die zur Berechnung verwendeten Größen hinsichtlich ihres Zeitverhaltens (Totzeit, Zeitkonstante) anzugleichen. Ein entsprechendes Verfahren wird bei Grauer [61] beschrieben. Im Rahmen der Fragestellungen dieser Arbeit ist dies jedoch nicht erforderlich.

5.4.2 Berechnung spezifischer Größen

Alternativ zu der in Kapitel 5.4.1 vorgestellten Korrektur von Messwerten anhand einer Referenzfunktion lässt sich das motorische Verhalten bei unterschiedlichen Betriebspunkten oder zwischen verschiedenen Motoren auch durch die Berechnung spezifischer Größen beurteilen.

Eine bei Verbrennungsmotoren bekannte und anerkannte spezifische Größe ist z. B. der spezifische Kraftstoffverbrauch:

$$b_e = \frac{\dot{m}_b}{P_{el}} \quad (3)$$

mit: b_e = spezifischer Kraftstoffverbrauch
 \dot{m}_b = Kraftstoffverbrauch
 P_{el} = elektrische Leistung des Generators

Wie bei der Vorstellung des Versuchsumfangs erwähnt, ist die Abgastemperatur die wichtigste und gleichzeitig eine sehr einfach zu messende Größe zur Beschreibung der Ablagerungsbildung. Um den Einfluss von Leistungsschwankungen innerhalb des Toleranzbandes der Leistungsregelung des BHKWs zu korrigieren, ist auch hier eine spezifische Betrachtung der Messgröße erforderlich. Da jedoch keine allgemeingültige Definition dafür existiert, wird die spezifische Abgastemperatur wie folgt definiert:

$$T_{\text{Abgas_spezifisch}} = \frac{T_{\text{Abgas}} - T_{\text{Saugrohr}}}{P_{\text{el}}} \quad (4)$$

Die so definierte spezifische Erwärmung der durch den Motor geleiteten Luft setzt sich zusammen aus der Erwärmung der angesaugten Luft während der Verdichtung (weitgehend unabhängig vom Betriebspunkt) und der Verbrennung (abhängig vom Betriebspunkt). Für kleine Leistungsschwankungen (weniger als $\pm 5\%$) kann diese Vorgehensweise als ausreichend genau angenommen werden. Durch Berücksichtigung der Ansaugtemperatur erfolgt eine teilweise Kompensation der Umgebungsbedingungen.

Die spezifische Abgastemperatur eignet sehr gut zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung, da die für die Berechnung erforderlichen Eingangsgrößen in der Regel Bestandteil aktueller Motorsensorik sind. Je nach Anforderung an die zeitliche Auflösung kann es auch hierbei erforderlich sein, die zur Berechnung verwendeten Größen hinsichtlich ihres Zeitverhaltens anzugleichen (siehe Kapitel 5.4.1).

5.4.3 Berechnung von Idealwerten

Eine weitere Variante zur Beurteilung des motorischen Verhaltens bei unterschiedlichen Betriebspunkten stellt die Berechnung von Idealwerten dar. Im Unterschied zu spezifischen Größen werden hier zusätzlich zum Einfluss der Generatorleistung auch fertigungs- oder montagebedingte Unterschiede in der Messung des Absolutwertes ausgeglichen. Dazu wird nach einer Inbetriebnahme, Wartung oder Reparatur und Abschluss der darauf folgenden Einlaufphase der Zusammenhang zwischen der beobachteten Messgröße und der jeweiligen Generatorleistung ermittelt und in Form einer Korrelationsgleichung dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Generatorleistung und Abgastemperatur kann bei den hier zu erwartenden Abweichungen durch ein Polynom 1. Ordnung ausreichend genau beschrieben werden. Daraus ergibt sich nachfolgende Gleichung für die prüflaufindividuelle Berechnung der idealen Abgastemperatur:

$$T_{\text{Abgas_ideal}} = m * P_{\text{el}} + c \quad (5)$$

Durch Einsetzen der tatsächlichen momentanen Generatorleistung ergibt sich ein idealer (theoretischer) Wert für die beobachtete Messgröße. Die Differenz zwischen der gemessenen realen Größe und dem idealen (theoretischen) Ergebnis ist ein Maß für ein abweichendes Betriebsverhalten. Auch hier kann eine rechnerische Anpassung des Zeitverhaltens von Abgastemperatur und Generatorleistung erforderlich sein (siehe Kapitel 5.4.1).

$$\Delta T_{\text{Abgas}} = T_{\text{Abgas_real}} - T_{\text{Abgas_ideal}} \quad (6)$$

Die Abweichung kann dabei entweder aus Veränderungen am Motor selbst (Ablagerungen, Verschleiß, etc.) oder aus veränderten Umgebungsbedingungen resultieren. Eine Differenzierung zwischen diesen beiden Ursachen ist nur mittels zusätzlicher kontinuierlicher Erfassung der Umgebungsbedingungen und entsprechenden zusätzlichen Korrekturalgorithmen möglich.

5.4.4 Vergleich der unterschiedlichen Korrekturverfahren

Um für die detaillierte Auswertung der einzelnen Prüfläufe das jeweils „passende“ Korrekturverfahren auswählen zu können, ist nachfolgend ein Vergleich der verschiedenen Methoden dargestellt. Abbildung 37 zeigt anhand eines Ausschnitts von 40 Betriebsstunden den Verlauf folgender Größen

- gemessene (reale) Abgastemperatur (unkorrigiert)
- entsprechend dem Betriebspunkt korrigierte Abgastemperatur (Kapitel 5.4.1)
- ideale Abgastemperatur (Kapitel 5.4.2)
- spezifische Abgastemperatur (Kapitel 5.4.2)
- Differenz zwischen der realen und der idealen Abgastemperatur (Kapitel 5.4.2)
- Generatorleistung (gleitender Mittelwert über 60 Sekunden)

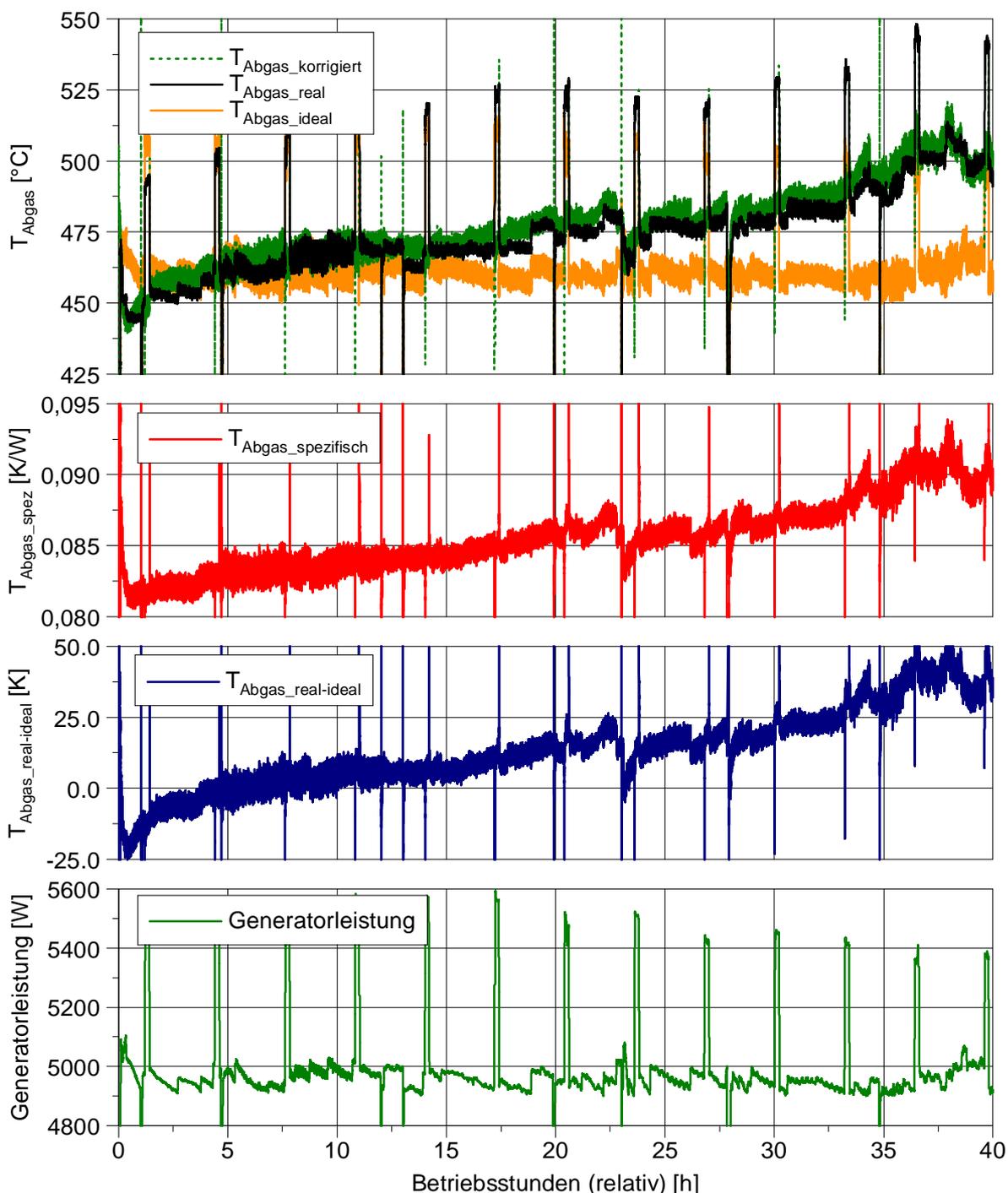


Abbildung 37: Vergleich unterschiedlicher Korrekturverfahren

Die wiederkehrenden Phasen mit ca. 10 % höherer Generatorleistung kennzeichnen die zyklisch durchgeführten DPF-Regenerationsvorgänge. Bei den Ausschlägen der Generatorleistung nach unten handelt es sich um Stillstandsphasen des BHKW.

In Abbildung 38 ist der Ausschnitt von Betriebsstunde 15 - 20 der Abbildung 37 dargestellt.

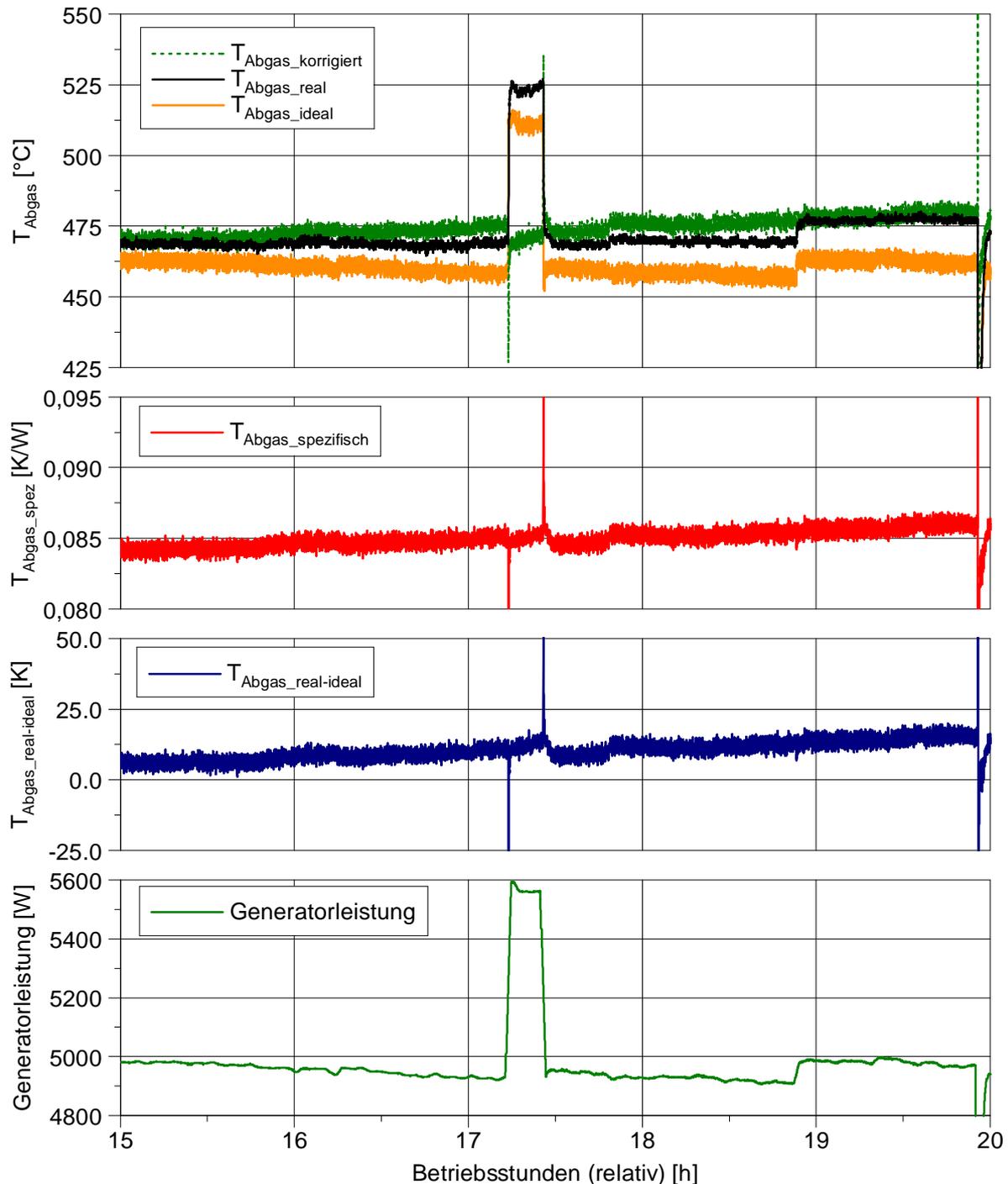


Abbildung 38: Vergleich unterschiedlicher Korrekturverfahren - Ausschnitt

Die Abbildung zeigt, dass bei großen Leistungssprüngen wie z. B. während der DPF-Regenerationsphasen eine leichte Überkompensation des Betriebspunktes erfolgt. Dies ist jedoch für die Korrektur der bei Nennleistung auftretenden Leistungsschwankungen nicht von Bedeutung.

Während die real gemessene Abgastemperatur lange Zeit konstant bleibt und bei ca. 18,8 Betriebsstunden einen Sprung aufweist, zeigt der betriebspunktkorrigierte Verlauf eine nahezu kontinuierliche Zunahme, was auf eine Verschlechterung der Verbrennung hindeutet. Die spezifische Abgastemperatur und die Differenz zwischen Realwert und Idealwert geben ebenfalls die in den betrachteten Zeiträumen auftretende Veränderung der Verbrennung wieder.

Der Verlauf der elektrischen Nennleistung des Generators bestätigt dies. Bei unveränderter Regelstangenposition ($\alpha = \text{konstant}$) hat die Leistung kontinuierlich abgenommen, bis bei ca. 18,8 Betriebsstunden ein Reglereingriff erfolgte.

Der Vergleich der verschiedenen Korrekturverfahren zeigt, dass sich die untersuchten Methoden hinsichtlich der Aussagekraft der korrigierten Messgröße nur unwesentlich unterscheiden. Abweichungen treten im Wesentlichen nur in den ersten Betriebsstunden, in denen noch kein stationärer Zustand der Temperaturverhältnisse in der Schallkapsel des BHKW erreicht ist, auf. Aufgrund der einfachen Berechnung und der Berücksichtigung der Saugrohrtemperatur wird als Standardverfahren zur Auswertung der Versuchsreihen dieser Arbeit generell die spezifische Abgastemperatur (Kapitel 5.4.2) verwendet.

5.4.5 Berechnung von Ergebniswerten zeitbasierter Signalverläufe

Wie Abbildung 37 und Abbildung 38 im vorigen Kapitel zeigen, ist der in der Regel vorhandene kontinuierliche Anstieg der spezifischen Abgastemperatur sowohl von einem Rauschen des Messsignals als auch von unregelmäßigen, meist sprunghaften Abfällen überlagert. Eine Auswertung eines Prüflaufs nur anhand des Anfangs- und Endzustands ist daher nicht sinnvoll. Zum differenzierten Vergleich des Ablagerungsauf- und -abbau verschiedener Kraftstoffe, konstruktiver Ausführungen oder Betriebsprofile sind daher Ergebniswerte erforderlich, welche den Signalverlauf hinsichtlich Auf- und Abbauvorgängen von Ablagerungen ausreichend genau beschreiben. Diese sollten außerdem möglichst unempfindlich gegenüber Signalrauschen oder anderen Störeinflüssen sein. Die zwei zu diesem Zweck im Rahmen dieser Arbeit definierten Verfahren werden nachfolgend im Detail vorgestellt.

Aus vielen Vorversuchen ist der typische Signalverlauf beim Auf- und Abbau von Ablagerungen, oder bei starkem Messrauschen bekannt. Diese verschiedenen Betriebssituationen unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich Frequenz und Amplitude der Signaländerungen. So ist Messrauschen durch eine kleine Signalamplitude bei hoher Signalfrequenz charakterisiert. Im Vergleich dazu verläuft der Auf- und Abbau von Ablagerungen langsam, jedoch mit wesentlich größeren Amplitudenänderungen des Messsignals.

Verfahren 1: Berechnung der Signalabweichung gegenüber einem idealen Signalverlauf

Während Rauschen nur zu kleinen Abweichungen des Signalverlaufs von einem ideal konstanten Signal führt, fallen die Signaländerungen bei Ablagerungsauf- und -abbau wesentlich größer aus. Eine Unterscheidung zwischen Signalrauschen und Ablagerungsauf- bzw. -abbau ist daher möglich, wenn durch ein geeignetes Verfahren große Abweichungen von einem Soll-Signalwert deutlich stärker bewertet werden als kleine Abweichungen. Dies ist beispielsweise durch Quadrieren der Abweichung möglich. Im einfachsten Fall kann ein Soll-Signalwert als das arithmetische Mittel des Signalverlaufs über einen bestimmten Zeitraum angenommen werden.

In Gleichung 7 ist eine entsprechende Vorgehensweise dargestellt. Die quadrierten Abweichungen der einzelnen Messwerte vom arithmetischen Mittel werden aufsummiert und durch die Anzahl der berücksichtigten Messwerte geteilt. Aus diesem Zwischenergebnis wird abschließend die Wurzel gezogen, um das Ergebnis in der gleichen Maßeinheit wie das Ausgangssignal darzustellen. Dieses Verfahren entspricht der Berechnung der Standardabweichung in der beschreibenden Statistik. Es ist jedoch von seiner Aussage nicht direkt mit der

Standardabweichung vergleichbar, da diese eine Normalverteilung der Stichproben voraussetzt. Daher wird hierfür im Rahmen dieser Arbeit anstatt des Begriffs „Standardabweichung“ die Bezeichnung „gewichtete Signalabweichung“, kurz „GSA“, verwendet.

$$\text{GSA} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_n)^2} \quad (7)$$

Die gewichtete Signalabweichung spiegelt die motorische Relevanz unterschiedlicher Ablagerungsvorgänge gut wieder und ermöglicht damit eine Bewertung von verschiedenen Einflussfaktoren auf die Ablagerungsbildung. Eine differenzierte Betrachtung der Aufbau- und Abbauvorgänge ist damit jedoch nicht möglich.

Für die Berechnung hat sich in Vorversuchen eine gleitende Mittelung der spezifischen Abgastemperatur über 3600 Messwerte als für die Darstellung und Auswertung vorteilhaft erwiesen. Ein für die durchgeführten Auswertungen relevanter Verlust an Informationen findet dabei nicht statt. Weiterhin werden die Betriebsphasen mit einer Generatorleistung kleiner 4750 W (Hochlauf) und größer 5250 W (DPF-Regeneration) bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Verfahren 2: Aufteilung des Signalverlaufs in Phasen positiver und negativer Steigung

Im Gegensatz zur Berechnung der gewichteten Signalabweichung, bei der jeweils der gesamte Signalverlauf ausgewertet wird, wird der Verlauf der Messgröße bei diesem Verfahren zunächst in Phasen mit positiver Steigung (Ablagerungsaufbau) und Phasen negativer Steigung (Ablagerungsabbau) zerlegt und zu einem neuen Signalverlauf zusammengefügt. Unter der vereinfachenden Annahme, dass Änderungen der spezifischen Abgastemperatur proportional zu Änderungen der vorhandenen Ablagerungsmenge sind, können damit die Bildungs- und Abbauvorgänge von Ablagerungen getrennt bewertet werden. Das Verfahren ist in Abbildung 39 dargestellt.

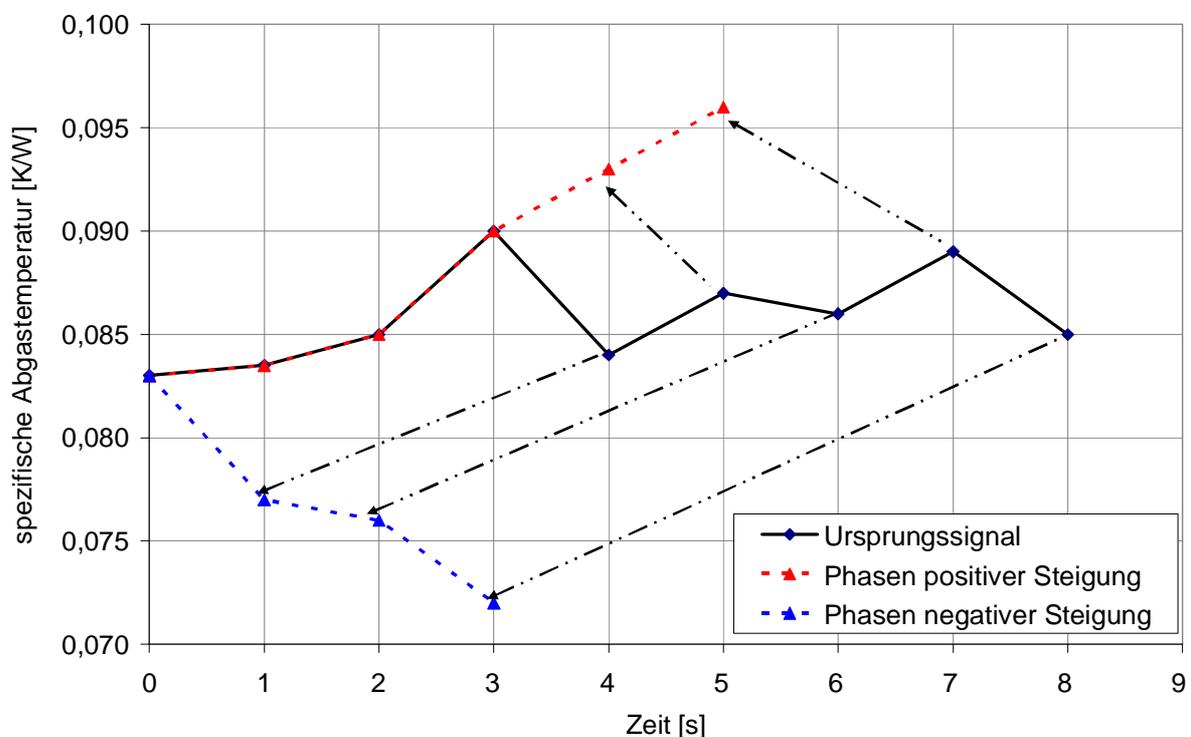


Abbildung 39: Aufteilung eines Signalverlaufs in Phasen positiver und negativer Steigung

Die mittleren Gradienten der Phasen positiver und negativer Steigung ermöglichen eine Aussage über die mittlere Geschwindigkeit des Ablagerungsauf- bzw. -abbaus. Große Werte sind ein Zeichen für sehr dynamische Ablagerungsvorgänge, können aber auch durch starkes

Signalrauschen hervorgerufen werden. Aus diesem Grund hat sich auch hier eine vorangehende gleitende Mittelung der Signalverläufe über 3600 Messwerte sowie die Beschränkung auf Betriebsphasen mit einer Generatorleistung zwischen 4750 W und 5250 W bewährt.

Die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Hauptschritte der Ablagerungsbildung lassen sich wie folgt zu den Phasen positiver und negativer Steigung zuordnen:

- Die Phasen positiver Steigung werden indirekt durch die Entstehung und den Transport von ablagerungsbildenden Komponenten (siehe Kapitel 2.2.2.1 und 2.2.2.2) sowie direkt durch deren Anhaften und Anwachsen an der Wand (siehe Kapitel 2.2.2.3) bestimmt.
- Die Phasen negativer Steigung werden bestimmt durch den Abtrag von Ablagerungen von der Wand (siehe Kapitel 2.2.2.4).

Weitere, aus der Aufteilung des Signalverlaufs in Phasen positiver und negativer Steigung abgeleitete Ergebniswerte wie die Auswertung der Zeitanteile von Phasen mit positiver und negativer Steigung oder die Integralwerte der Teilsignalverläufe bleiben unberücksichtigt, da diese in Vorversuchen keinen eindeutigen Zusammenhang mit dem Ablagerungsverhalten erkennen ließen, oder eine starke Querempfindlichkeit gegenüber Signalrauschen aufweisen.

5.5 Verfahren zur Komponentenbeurteilung

Neben der Bewertung von Ablagerungen aufgrund der von ihnen verursachten Beeinflussung des Betriebs- oder Emissionsverhaltens des Motors werden im Rahmen dieser Arbeit weitere Methoden angewendet, um den Ablagerungsaufbau direkt (ohne die daraus resultierenden motorischen Konsequenzen) beurteilen zu können. Damit lassen sich Ursachen und Abhängigkeiten der Ablagerungsbildung genauer eingrenzen. Dazu werden die relevanten Bauteile vor und nach einem Prüflauf nach genau festgelegten Kriterien beurteilt. Die Auswahl von geeigneten Kriterien richtet sich nach dem Bauteil und seiner Funktion im Verbrennungsmotor sowie nach der Zielsetzung der Beurteilung.

Grundsätzlich können Beurteilungsverfahren in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Visuelle Verfahren: Beurteilung der Beschaffenheit, insbesondere der Farbe der Bauteiloberfläche
- Geometrische Verfahren: Beurteilung von Geometrieänderungen durch Ablagerungsaufbau
- Gravimetrische Verfahren: Beurteilung der Ablagerungsmasse
- Pneumatische bzw. hydraulische Verfahren: Beurteilung des strömungsmechanischen Verhaltens des Bauteils
- Chemische Verfahren: Beurteilung der chemischen Zusammensetzung der Ablagerungen

Auf chemische Verfahren wird im Rahmen dieser Arbeit – bis auf eine exemplarisch durchgeführte Ausnahme – verzichtet, da die relevanten Ablagerungen eindeutig den jeweils eingesetzten Kraftstoffen bzw. deren Komponenten zugeordnet werden können.

Die nachfolgende

Tabelle 17 zeigt eine Übersicht der beurteilten Bauelemente und der jeweils angewendeten Verfahren. Diese werden in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgestellt.

Tabelle 17: Übersicht über Verfahren zur Bauteilbeurteilung

	Verfahren				
	visuell		geometrisch	pneumatisch	gravimetrisch
	während Prüflauf (Endoskopie)	nach Prüflauf	Projektion		
Einspritzdüse		X	X	(X)	
Kolben		X			
Ventile	X	X			
Brennraumdecke	X	X			
Partikelfilter		X		X	X

Auf eine gravimetrische Bestimmung der im Brennraum gebildeten Ablagerungsmassen wird aufgrund der besonderen Bauweise des verwendeten Verbrennungsmotors (Zylinderkopf und Laubuchse aus einem Stück) verzichtet. Die Ablagerungsmasse ist im Vergleich zum Gesamtgewicht des Bauteils (ca. 40 kg) sehr gering, so dass bei einer Wägung des gesamten Bauteils eine durch Ablagerungen verursachte Gewichtszunahme nicht nachgewiesen werden kann. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit zu Brennraumdecke und Feuerstegbereich ist es nicht möglich, die Ablagerungen sicher komplett zu entfernen und somit ihre Gesamtmasse zu bestimmen. Eine gravimetrische Bestimmung der Ablagerungsmasse am Kolben gestaltet sich ebenfalls schwierig, da Teile der Ablagerungen im Feuerstegbereich teilweise am Kolben, teilweise an der Laubuchse festkleben.

5.5.1 Einspritzdüse

Die Beurteilung der Ablagerungsbildung an der Einspritzdüse erfolgt visuell, geometrisch und pneumatisch. Dabei dient die visuelle Befundung primär dem Vergleich der unter verschiedenen Randbedingungen gebildeten Ablagerungen. Mittels der geometrischen und pneumatischen Beurteilung soll eine Quantifizierung der Ablagerungsbildung erfolgen.

Im Rahmen der **visuellen Befundung** werden die Einspritzdüsen nach dem jeweiligen Prüflauf in folgenden zuvor festgelegten Ansichten fotografiert:

- Düsenspitze von außen: senkrecht von vorn
schräg aus vier um 90° gedrehten Ansichten
- Düsenspitze von innen: senkrecht mit Boroskop (Düsenadel entfernt)

Eine Gegenüberstellung der Aufnahmen aus verschiedenen Prüfläufen ermöglicht so eine subjektive Beschreibung der gebildeten Ablagerungen.

Die **geometrische Befundung** erfolgt getrennt für jedes Spritzloch mittels Projektion des Düsenprofils in fünf Ebenen (entsprechend der Anzahl der Spritzlöcher) und automatischer Auswertung der Größe des projizierten Schattens. Dabei wird nur die Hälfte der Projektion der Einspritzdüsen spitze zur Auswertung herangezogen, in der das jeweilige Spritzloch rechtwinklig zur Kameraachse ausgerichtet ist. Damit kann die Ablagerungsbildung für jedes Spritzloch getrennt erfasst werden. Ein quantitativer Vergleich ist somit sowohl zwischen unterschiedlichen Prüfläufen als auch über den Umfang der Einspritzdüsen hinweg möglich. Neben der quantitativen Auswertung der Projektionsbilder erfolgt teilweise auch eine subjektive Beschreibung ein-

zelner Ablagerungsprofile. Die Erfassung und Analyse der Düsenprofile wird mittels eines Bildverarbeitungssystems Keyence CV-3501P durchgeführt.

Ein ähnliches Verfahren wurde – wie in Kapitel 2.2.5 erwähnt – z. B. von Medoza et al. [118] zur Bewertung der Reinigungswirkung von Diesel-Ethanol-Gemischen angewendet. Hierbei wurde jedoch stets die gesamte Projektion der Düsenkuppe ausgewertet, wodurch eine düsenlochspezifische Beschreibung der Ablagerungsbildung nicht möglich war.

Als weiteres Verfahren zur quantitativen Beschreibung der Belagsbildung war die **pneumatische** Durchströmung der mit Ablagerungen belegten Einspritzdüsen nach einem Verfahren ähnlich der DIN ISO 4010 vorgesehen. Wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, sind die Literaturaussagen zur Eignung dieses – für Zapfendüsen entwickelten – Verfahrens bei Lochdüsen nicht einheitlich. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass eine entsprechende Beurteilung des strömungsmechanischen Verhaltens der in dieser Arbeit eingesetzten Einspritzdüsen nicht aussagekräftig ist. Dieses Verfahren wird daher nicht weiter verfolgt.

Auf eine Ermittlung des hydraulischen Durchflusses beim Düsenhersteller wird verzichtet, um die Ablagerungen für eine eventuelle spätere chemische Analyse nicht zu verändern.

Neben diesen Verfahren zur Beurteilung der Ablagerungsbildung auf Einspritzdüsen nach einem Prüflauf wird im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren zur Beurteilung der Auswirkungen der Belagsbildung auf den hydraulischen Durchfluss und die Güte der Zerstäubung während des Motorbetriebs entwickelt. Dieses ist in Kapitel 7.4 beschrieben.

5.5.2 Kolben/Ventile/Brennraumdecke

Aufgrund der bereits genannten Gründe erfolgt eine Beurteilung der Belagsbildung an Kolben, Ventilen und der Brennraumdecke rein visuell. Dazu werden die entsprechenden Bauteile ähnlich der visuellen Befundung der Einspritzdüsen nach dem jeweiligen Prüflauf in folgenden Ansichten fotografiert:

- Kolben: Kolbenboden
Seitenansicht der Ringzone aus vier Ansichten
- Ventile: Ventilteller
Ventiltulpe und -schaft aus vier Ansichten
- Brennraumdecke: senkrecht vom Kolben aus

Mittels eines Quervergleichs dieser Ansichten über verschiedene Prüfläufe hinweg kann anschließend eine qualitative Beurteilung der Belagsbildung durchgeführt werden.

Zusätzlich erfolgt während der Untersuchungen zum Einfluss des Kraftstoffs zwischen den einzelnen Versuchsphasen eine endoskopische Untersuchung des Brennraums. Damit ist es möglich, den zeitlichen Verlauf der Ablagerungsbildung grob zu beschreiben.

5.5.3 Partikelfilter

Die Beurteilung der Ablagerungsbildung im Partikelfilter erfolgt sowohl gravimetrisch als auch mittels pneumatischer Durchströmung zu Beginn und am Ende eines Prüflaufs. Durch die besondere Bauweise des Abgassystems kann der Partikelfilter einfach entnommen und gewogen werden. Dies wird im Rahmen der Untersuchungen zum Kraftstoffeinfluss täglich (alle 24 Betriebsstunden (Dauerlauf) bzw. 12 Betriebsstunden (Taktbetrieb)) durchgeführt. Zu Beginn sowie am Ende eines Prüflaufs wird zusätzlich auf einem Prüfstand die Druckdifferenz über den Filter bei stationärer Durchströmung mit Luft aufgenommen.

Zur weiteren Verifikation soll mindestens ein Partikelfilter nach der Beurteilung geöffnet werden, um die Ablagerungsansammlung in den Filterkanälen begutachten zu können.

6 Ergebnisse und Diskussion der Untersuchungen zur Ablagerungsbildung

Nach den in Kapitel 4.1 aufgestellten Thesen zur Ablagerungsbildung wird diese hauptsächlich durch die eingesetzten Betriebsstoffe, das Betriebsprofil und das Temperaturniveau bestimmt. Der Einfluss dieser drei Faktoren wird in den folgenden Unterkapiteln anhand des Verlaufs der spezifischen Abgastemperatur bewertet und durch Betrachtung des Emissionsverhaltens und den Ergebnissen der Bauteilbefundung ergänzt. Die inhaltliche Diskussion der Thesen erfolgt im Anschluss in Kapitel 8.

6.1 Einfluss des Kraftstoffs

Zur Untersuchung des Einflusses der Kraftstoffzusammensetzung auf die Ablagerungsbildung wurde das Betriebsverhalten der beiden BHKW mit jeweils vier unterschiedlichen Kraftstoffen über 250 Betriebsstunden Dauerlauf und anschließend 250 Betriebsstunden Taktbetrieb (1 h an, 1 h aus) beobachtet. Am Ende der Dauerlaufphase und nach Abschluss des jeweiligen Prüflaufs erfolgte zusätzliche eine Befundung der von Ablagerungsbildung betroffenen Bauteile.

Für diese Untersuchungen waren die BHKW mit dem serienmäßigen DPF ausgestattet. Die Abgastemperatur spiegelt daher den Gesamtzustand von Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem wieder. Eine Differenzierung der Ablagerungen nach ihrem Ort erfolgt in den anschließenden Kapiteln und Prüfläufen.

6.1.1 Betriebsverhalten

Das Betriebsverhalten wurde hauptsächlich anhand der kontinuierlich aufgezeichneten spezifischen Abgastemperatur des Verbrennungsmotors bewertet. Um eine Fehlinterpretation der Ergebnisse auszuschließen, wurde anhand weiterer aufgezeichneter Messgrößen eine Überprüfung hinsichtlich relevanter Quereinflüsse durchgeführt.

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen den Verlauf der spezifischen Abgastemperatur beim Betrieb mit den vier unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten im direkten Vergleich über 250 Betriebsstunden Dauerlauf. Die den Diagrammen zu entnehmenden unterschiedlichen Absolutwerte der spezifischen Abgastemperatur zum Zeitpunkt „0“ resultieren aus Bauteil- und Montagetoleranzen und stehen nicht mit dem Ablagerungsverhalten des Kraftstoffs in Zusammenhang.

Beim Betrieb des BHKW 1 mit RÖK 4 ist zwischen 120 und 180 Betriebsstunden ein höheres Niveau der spezifischen Abgastemperatur erkennbar. Die Ursache dafür liegt in einem Defekt der Abgasgegendruckmesstechnik, welcher erst nach drei Tagen behoben werden konnte. In dieser Zeit war das Thermoelement zur Messung der Abgastemperatur einer stark erhöhten Umströmung ausgesetzt, welche zu einem Anstieg der gemessenen Temperaturen führte. In den in Abbildung 48, Abbildung 49 und Abbildung 50 vorgestellten Auswertungen ist dies entsprechend korrigiert.

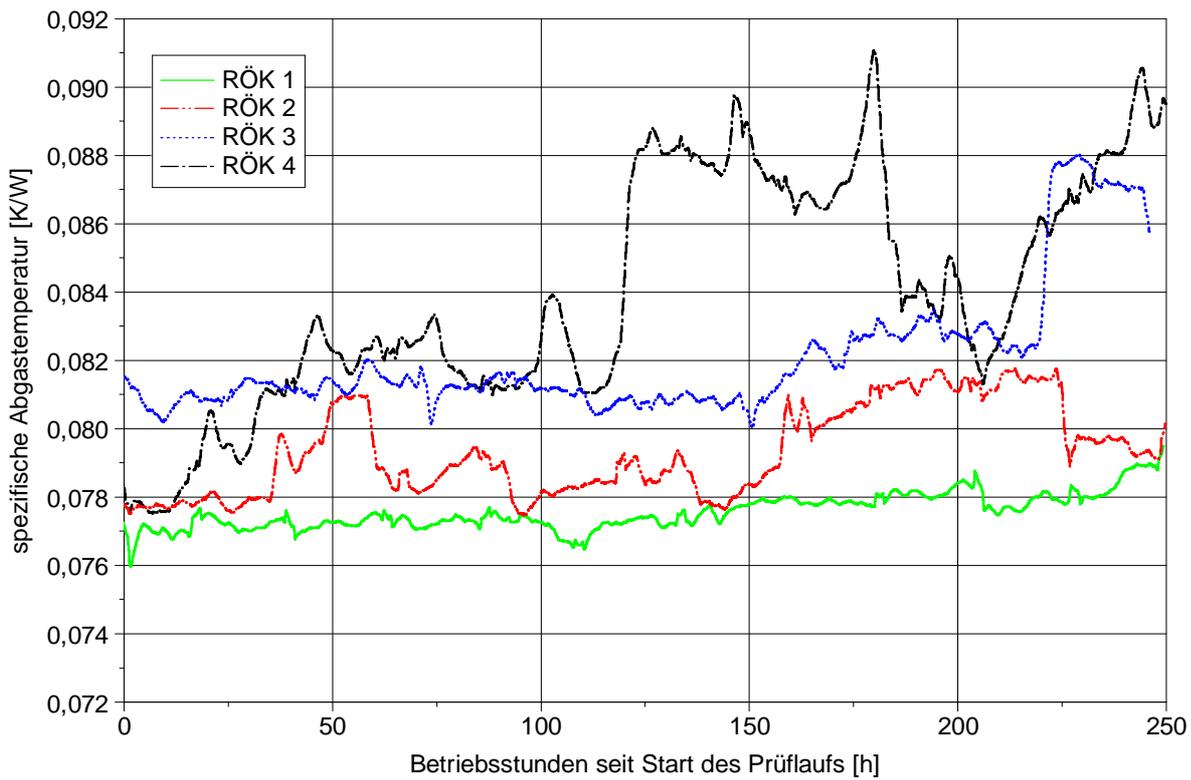


Abbildung 40: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Dauerbetrieb)

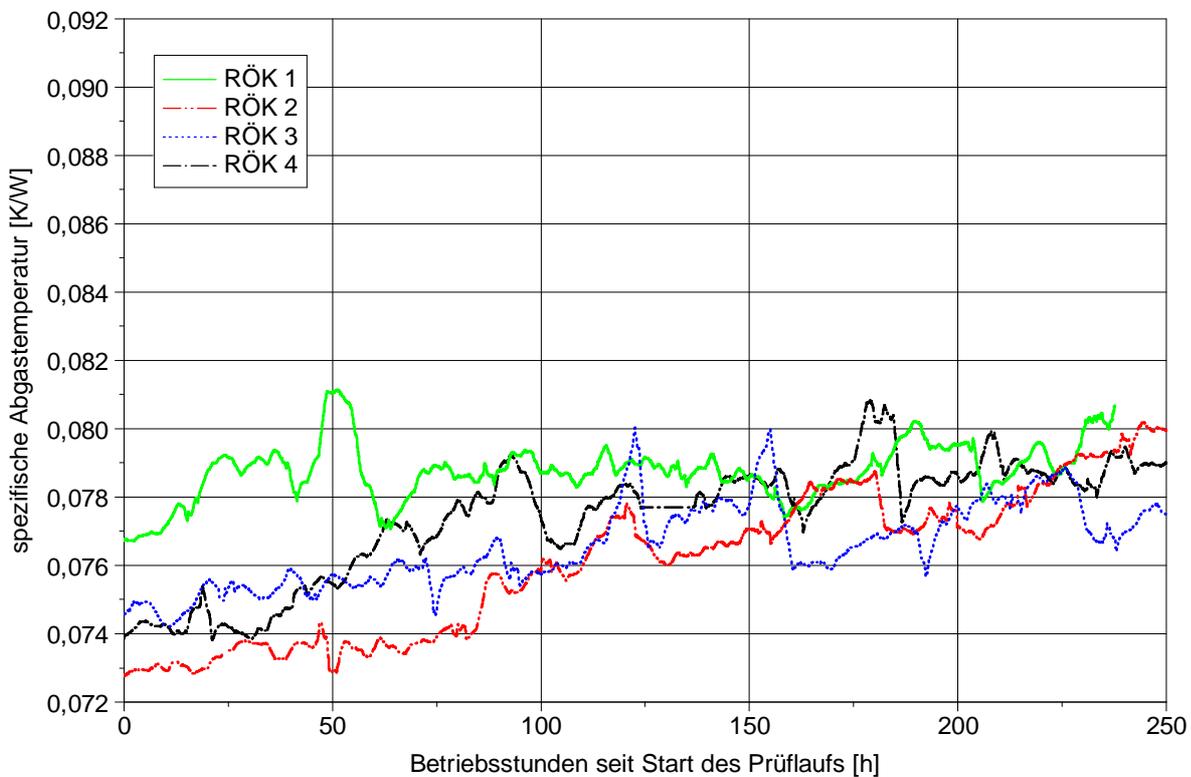


Abbildung 41: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Dauerbetrieb)

Bei allen Prüfläufen ist die spezifische Abgastemperatur bei beiden BHKW am Ende des Prüflaufs gegenüber dem Anfangswert deutlich erhöht. Dieser grundsätzliche Trend ist jedoch von Sprungereignissen überlagert, die einen großen Einfluss auf die auf diese Art ermittelte Differenz der spezifischen Abgastemperatur über einen Prüflauf haben. Dies hat zur Folge, dass z. B. bei BHKW 1 ein Vergleich der Differenz zwischen Start- und Endwerten keinen eindeutigen Unterschied zwischen dem Betrieb mit RÖK 1 und RÖK 2 zeigt, trotz deutlicher Unterschiede in den Signalverläufen. In Abbildung 42 und Abbildung 43 sind daher die Signalverläufe aus Abbildung 40 und Abbildung 41 entsprechend dem in Kapitel 5.4.5 vorgestellten Verfahren in Phasen positiver und negativer Signaländerungen aufgeteilt. Diese stehen stellvertretend für den Auf- und Abbau von Ablagerungen.

Die in Abbildung 42 dargestellten Dauerbetriebsprüfläufe mit BHKW 1 zeigen zunächst eine deutliche Abhängigkeit beider Vorgänge von der Kraftstoffqualität. Allerdings ist die Phase der falsch gemessenen Abgastemperatur auch in diesen Signalverläufen erkennbar (Sprung nach oben bei ca. 65 h, Sprung nach unten bei ca. 80 h). Wird diese Fehlmessung korrigiert, ist der Verlauf der spezifischen Abgastemperatur beim Betrieb mit RÖK 4 dem beim Betrieb mit RÖK 3 sehr ähnlich. Der gegen Ende des Prüflaufs mit RÖK 3 aufgetretene Positivsprung konnte nicht mit einer Störung des Prüflaufs oder der Messdatenerfassung in Verbindung gebracht werden.

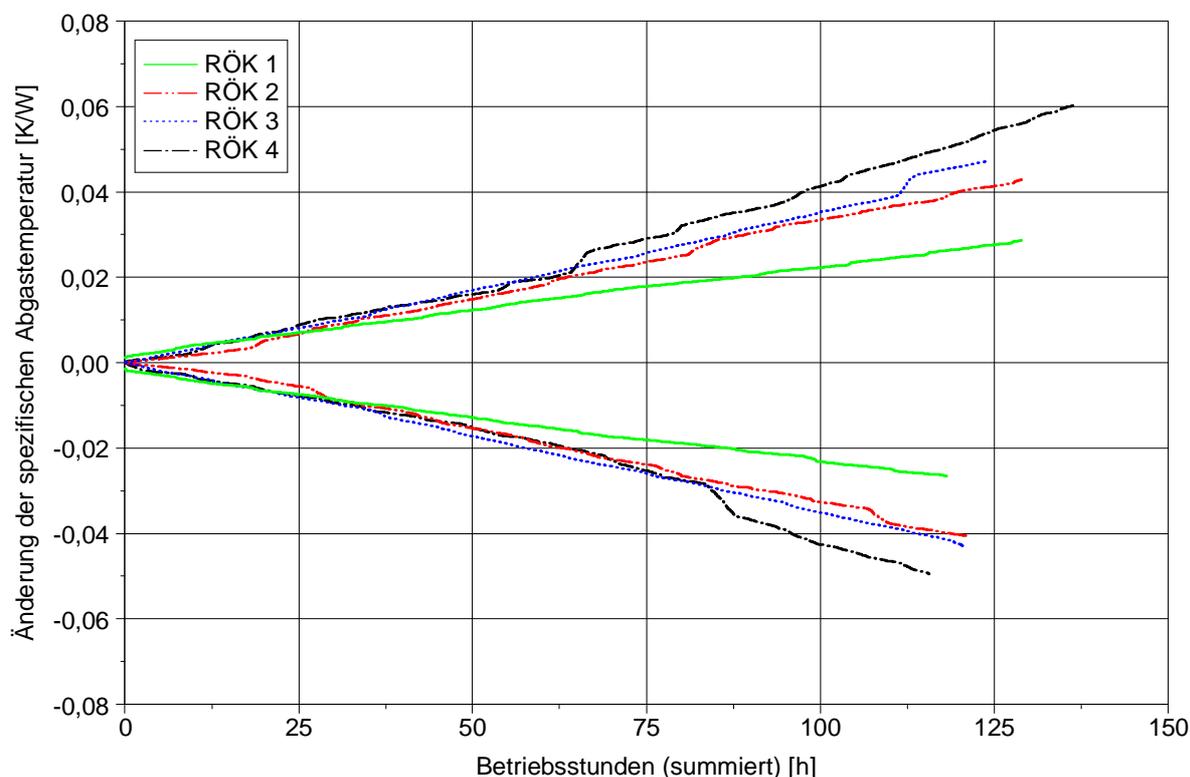


Abbildung 42: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Dauerbetrieb)

Ein anderes Bild zeigen die in Abbildung 43 dargestellten Signalverläufe der Prüfläufe mit BHKW 2. Aufgrund der sehr starken Schwankungen der spezifischen Abgastemperatur über der gesamten Dauer des Prüflaufs beim Betrieb mit RÖK 1 ist die Summe der positiven und die Summe der negativen Änderungen jeweils deutlich größer als bei den drei anderen Prüfläufen. Die Ursache dafür ist vermutlich in einem mit Ölkohle belegten Einlassventil zu suchen (siehe auch Kapitel 6.1.2 und 6.1.3.3).

Die Betrachtung der Prüfläufe mit RÖK 2 bis RÖK 4 zeigt keine deutlichen Unterschiede in den Phasen des Ablagerungsabbaus. Die Signalverläufe mit steigendem Verlauf lassen einen klei-

nen Unterschied beim Betrieb mit RÖK 4 gegenüber dem Betrieb mit RÖK 2 und RÖK 3 erkennen, was auf Unterschiede im Ablagerungsaufbau hin deutet.

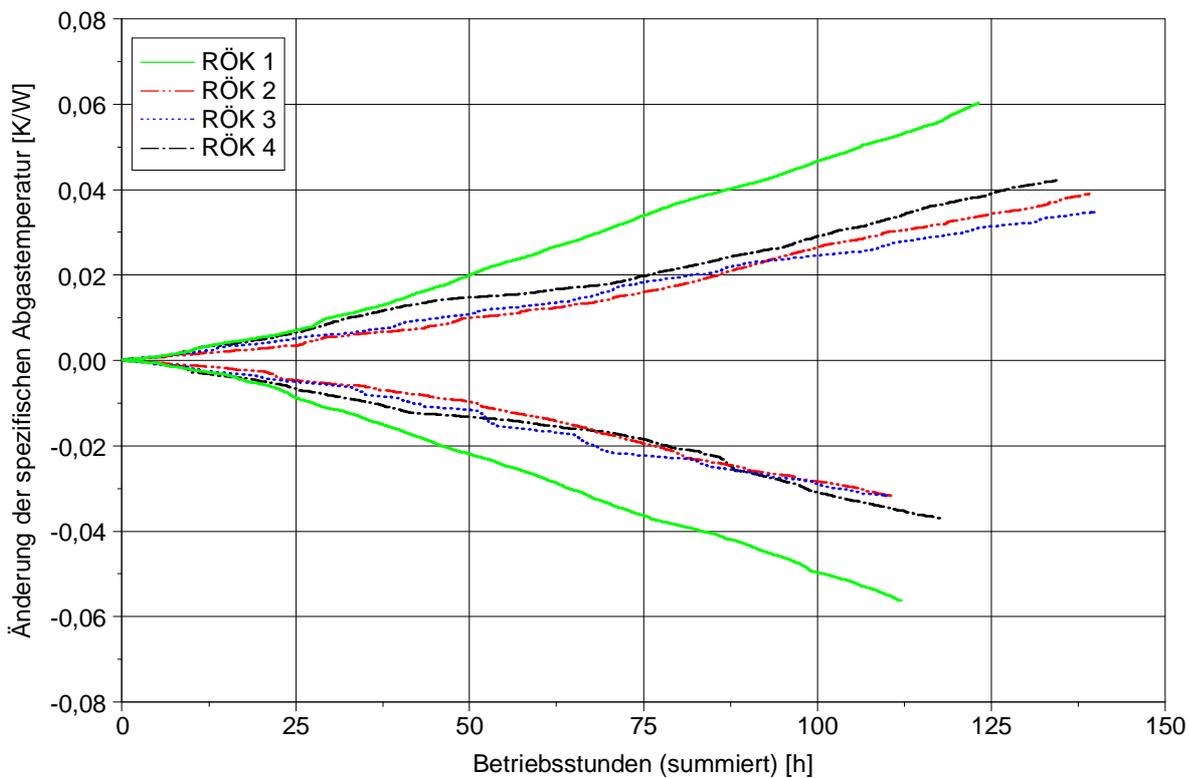


Abbildung 43: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Dauerbetrieb)

Ein ähnliches Bild liefert die Auswertung der in Abbildung 44 und Abbildung 45 dargestellten Taktbetriebsphasen beider BHKW. Auch hier sind wieder die aus Bauteil- und Montageteranzen resultierenden unterschiedlichen Absolutwerte der spezifischen Abgastemperatur sowie Unterschiede in der Gleichmäßigkeit des Signals zu sehen.

Bei BHKW 1 musste beim Betrieb mit RÖK 4 nach ca. 116 Betriebsstunden im Taktbetrieb der Partikelfilter aufgrund von überhöhtem Abgasgedruck und überhöhter Abgastemperatur getauscht werden, was in einem starken Abfall der spezifischen Abgastemperatur resultiert. Ca. 35 Betriebsstunden zuvor war ebenfalls ein starker kurzzeitiger Anstieg der spezifischen Abgastemperatur zu verzeichnen. Die Ursache dafür lässt sich nicht eindeutig klären, ist jedoch vermutlich auf Ablagerungsauf- und -abbau an der Einspritzdüse zurück zu führen.

Nach knapp 200 Betriebsstunden Taktbetrieb des BHKW 2 mit RÖK 1 deutete der im Rahmen der täglichen Emissionsmessung aufgenommene Druck im internen Kühlkreislauf auf eine beginnende Undichtigkeit zwischen Brennraum und Kühlwassermantel hin (vermutlich verursacht durch die Montagehülse des Zylinderdrucksensors), siehe auch Kapitel 6.1.3.3. Aus diesem Grund wurde dieser Prüflauf daraufhin beendet.

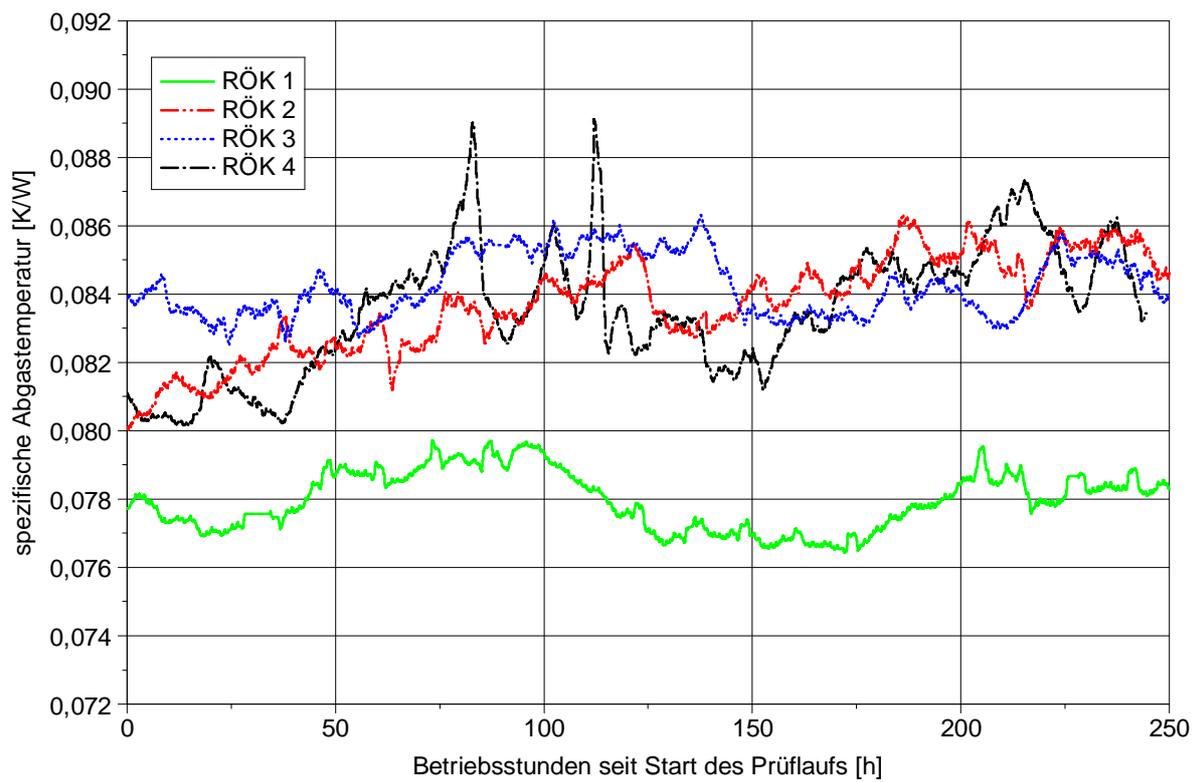


Abbildung 44: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Taktbetrieb)

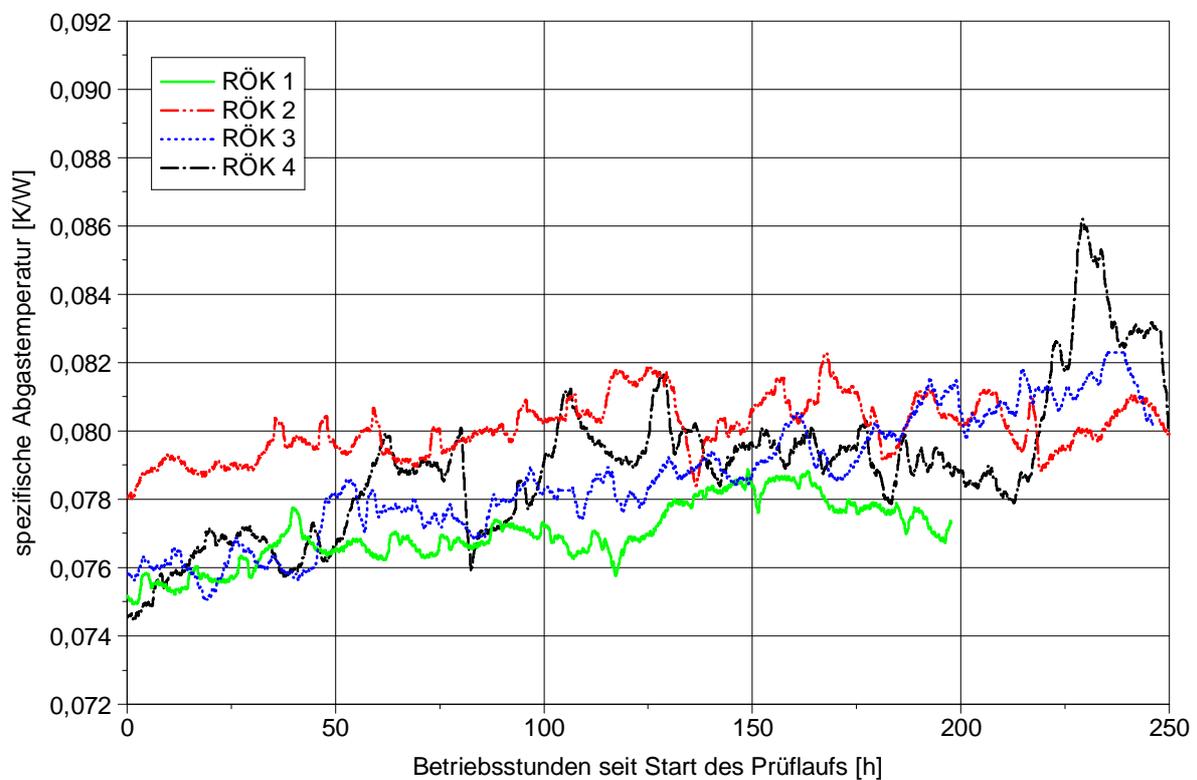


Abbildung 45: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Taktbetrieb)

Die getrennte Betrachtung von Phasen positiver und negativer Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (siehe Abbildung 46 und Abbildung 47) zeigt bei BHKW 1 wieder deutliche Unterschiede zwischen dem Betrieb mit RÖK 1 und dem Betrieb mit den Kraftstoffen RÖK 2, RÖK 3 und RÖK 4. Die Unterschiede zwischen den drei letztgenannten Prüfläufen erscheinen dagegen unter Berücksichtigung der durch den DPF-Austausch verursachten Einflüsse sehr gering.

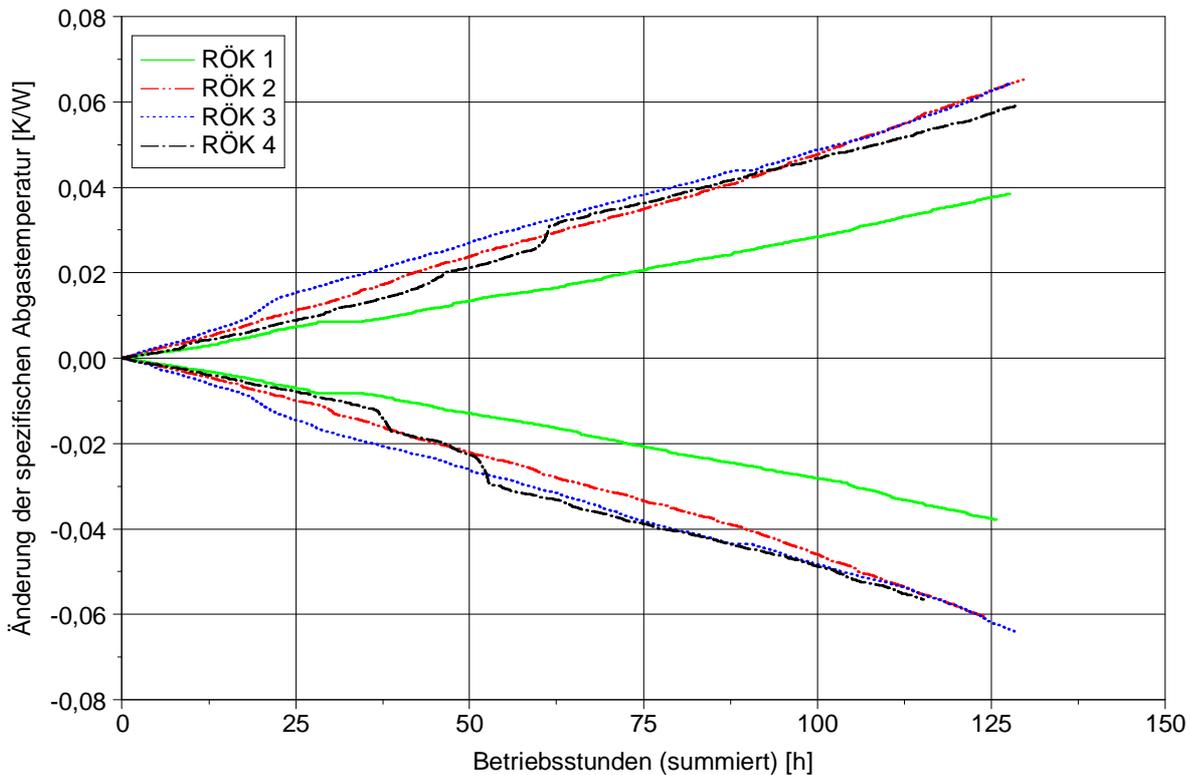


Abbildung 46: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Taktbetrieb)

Bei BHKW 2 ist der Unterschied zwischen dem Betrieb mit RÖK 1 und dem Betrieb mit RÖK 2, RÖK 3 und RÖK 4 weniger stark ausgeprägt, dafür ist (unter Berücksichtigung der Startwerte) eine Abstufung der Ablagerungsbildung zwischen den drei letztgenannten Kraftstoffen zu erkennen.

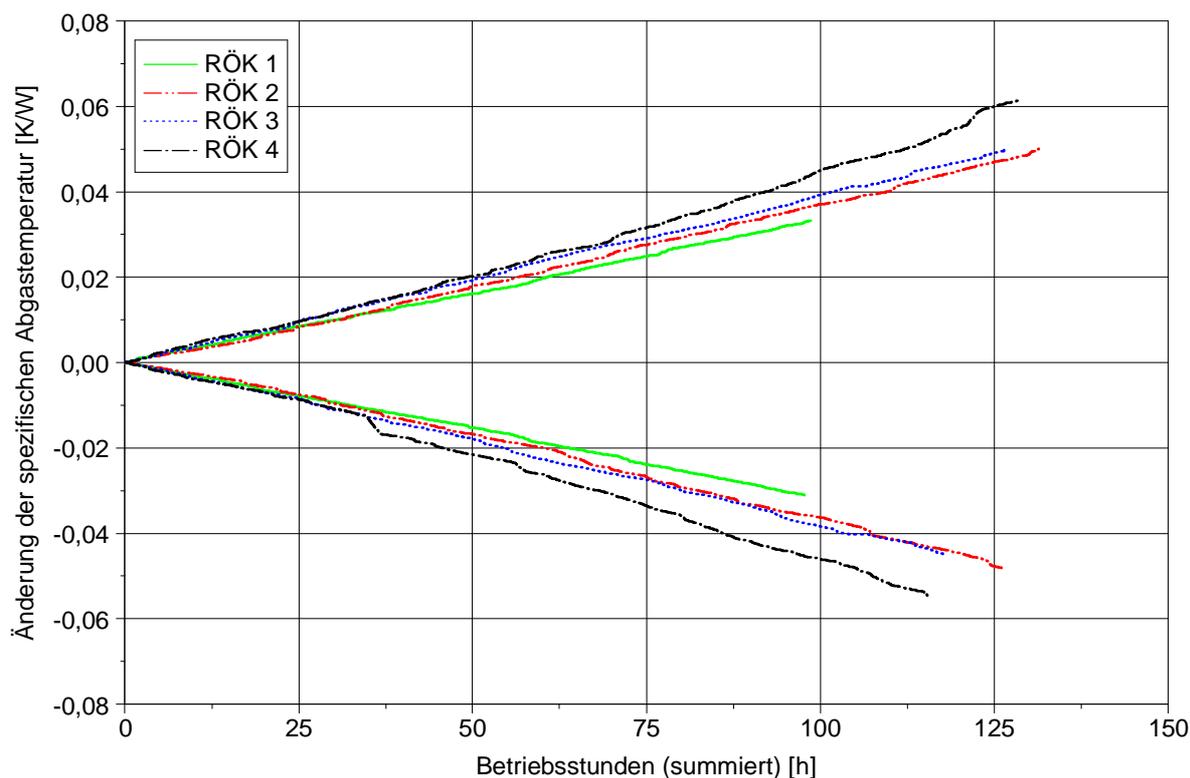


Abbildung 47: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Taktbetrieb)

Abbildung 48 zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen der Kraftstoffzusammensetzung und der Ablagerungsbildung im Gesamtsystem „Motor und Abgasnachbehandlung“, repräsentiert durch den mittleren Gradienten der aufsummierten positiven Änderungen der spezifischen Abgastemperatur. Beim Taktbetrieb mit RÖK 4 in BHKW 1 erfolgt eine getrennte Betrachtung der Phasen vor und nach dem Austausch des DPF.

Innerhalb der durchgeführten Versuchsreihen ist eine unterschiedlich stark ausgeprägte Abhängigkeit des Ablagerungsaufbaus vom Summengehalt Phosphor, Calcium und Magnesium des Kraftstoffs erkennbar. Besonders deutlich ausgeprägt ist der Zusammenhang bei den Prüfläufen mit BHKW 1 im Dauerbetrieb. Demselben Trend folgt BHKW 2 im Taktbetrieb, allerdings sind hier die Unterschiede zwischen den Prüfläufen mit unterschiedlichen Kraftstoffen weniger stark ausgeprägt.

Beim Taktbetrieb mit BHKW 1 ist zwischen dem Betrieb mit RÖK 2, RÖK 3 und RÖK 4 kein Unterschied zu erkennen, nach Tausch des Partikelfilters verläuft der Ablagerungsaufbau in der zweiten Phase des Prüflaufs sogar langsamer als mit RÖK 2 oder RÖK 3.

Das Verhalten der Dauerbetriebsprüfläufe mit BHKW 2 weicht vom zuvor beschriebenen Verhalten deutlich ab. Auffällig ist zunächst der scheinbar sehr starke Ablagerungsaufbau mit RÖK 1, während die entsprechenden Werte für den Betrieb mit RÖK 2, RÖK 3 und RÖK 4 auf einem deutlich niedrigerem Niveau liegen und nur gering voneinander abweichen. Hinweise zur Erklärung dieser Beobachtung sind in den nachfolgenden Betrachtungen zum Ablagerungsabbau und der Gleichmäßigkeit des Betriebs zu finden.

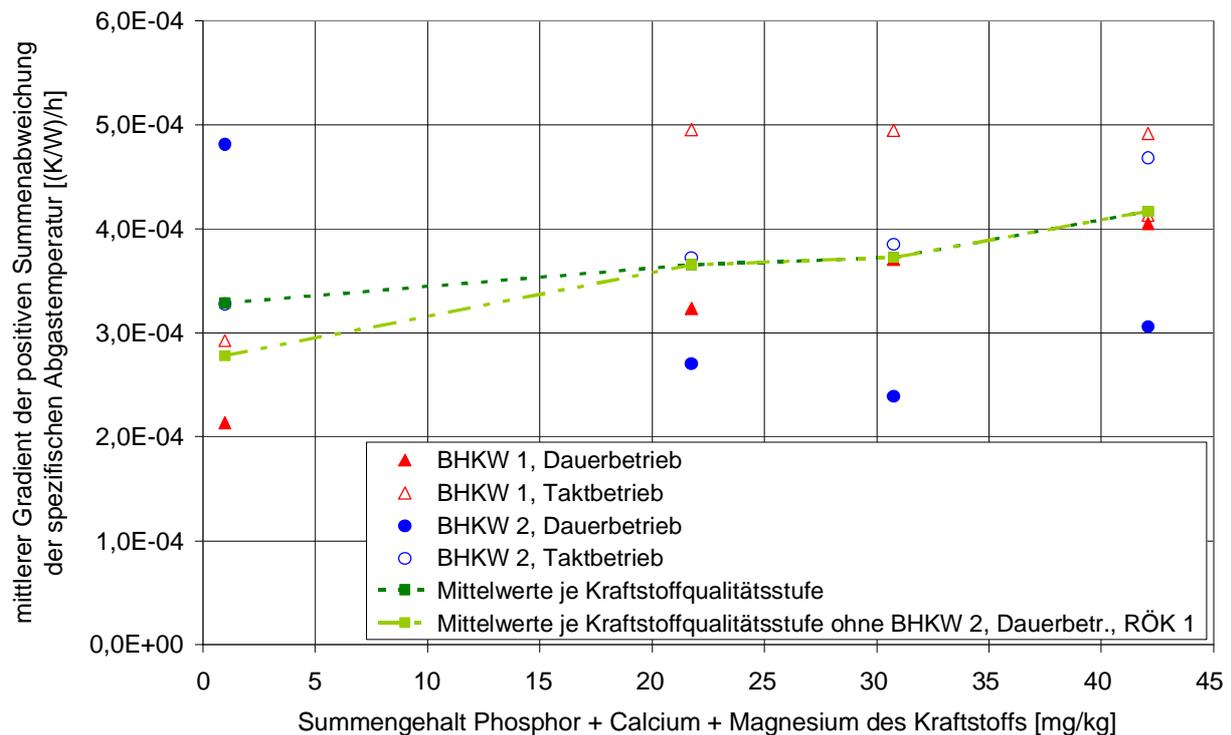


Abbildung 48: Zusammenhang zwischen Ablagerungsaufbau und Kraftstoffzusammensetzung

Der in Abbildung 49 dargestellte Ablagerungsabbau im Gesamtsystem „Motor + Abgasnachbehandlung“, repräsentiert durch den mittleren Gradienten der aufsummierten negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur, entspricht nahezu dem Spiegelbild des Ablagerungsaufbaus (Abbildung 48). Dies bedeutet, dass eine stärkere Ablagerungsbildung in der Regel auch mit einem stärkeren Ablagerungsabbau einhergeht.

Wie bereits beim Ablagerungsaufbau weicht auch hier das Verhalten von BHKW 2 insbesondere mit RÖK 1 von den restlichen Prüfläufen ab.

Eine Gegenüberstellung der Gradienten von positiven und negativen Änderungen zeigt, dass der Ablagerungsabbau tendenziell schneller erfolgt als der Ablagerungsaufbau.

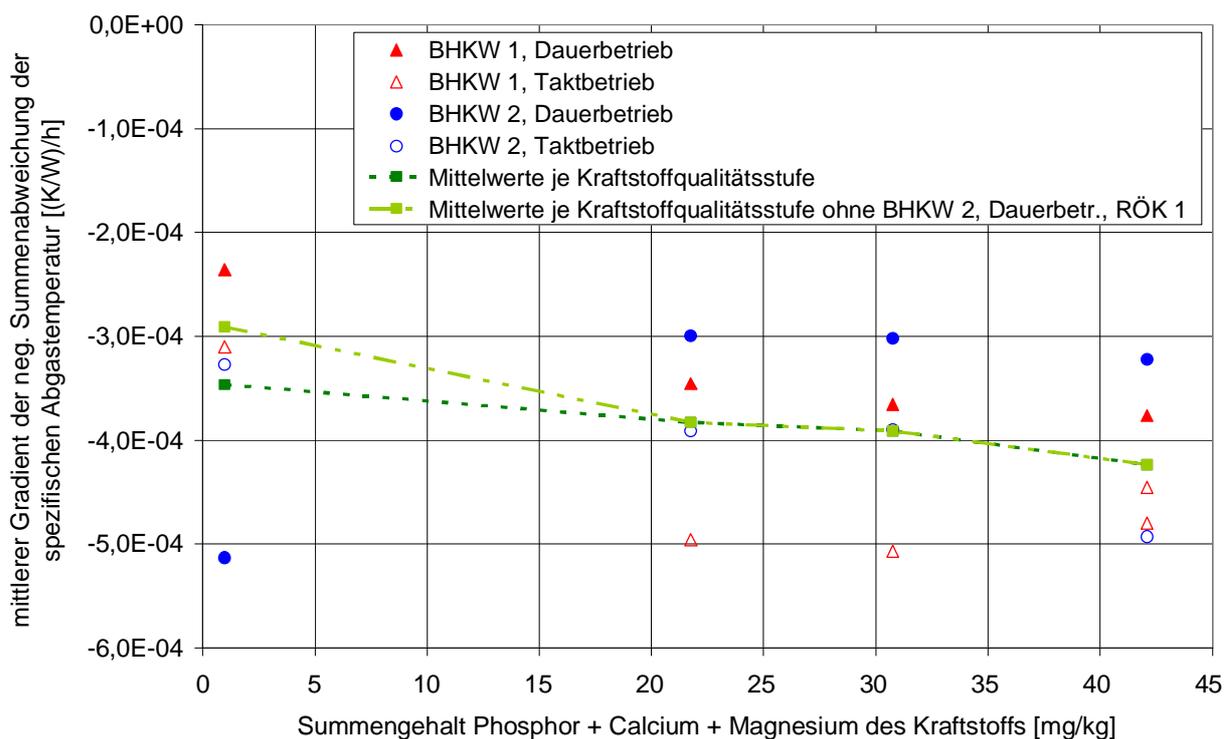


Abbildung 49: Zusammenhang zwischen Ablagerungsabbau und Kraftstoffzusammensetzung

Für eine weiterführende Auswertung des Einflusses der Kraftstoffqualität ist in Abbildung 50 die gewichtete Signalabweichung der einzelnen Prüfläufe über der Kraftstoffzusammensetzung dargestellt.

Der geringere Einfluss eines ungleichmäßigen Signalverlaufs auf annähernd konstantem Niveau gegenüber einer tatsächlichen Änderung der spezifischen Abgastemperatur ist sehr deutlich anhand des für den Prüflauf mit RÖK 1 im Dauerbetrieb in BHKW 2 ermittelten Werts zu erkennen. Dieser Wert liegt jetzt im Bereich der anderen Prüfläufe mit RÖK 1.

Um eine Vergleichbarkeit der Messwerte untereinander zu gewährleisten, müssen die einzelnen Signalverläufe über eine annähernd gleiche Anzahl Messgrößen verfügen. Aus diesem Grund ist eine getrennte Betrachtung der Signalverläufe im Taktbetrieb mit RÖK 4 in BHKW 1 vor und nach dem Austausch des DPF nicht sinnvoll.

Aufgrund der temporären Fehlmessung einer erhöhten Abgastemperatur beim Betrieb mit RÖK 4 in BHKW 1 ist der entsprechende in Abbildung 50 dargestellte Messwert als Ausreißer zu bewerten und wurde daher bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

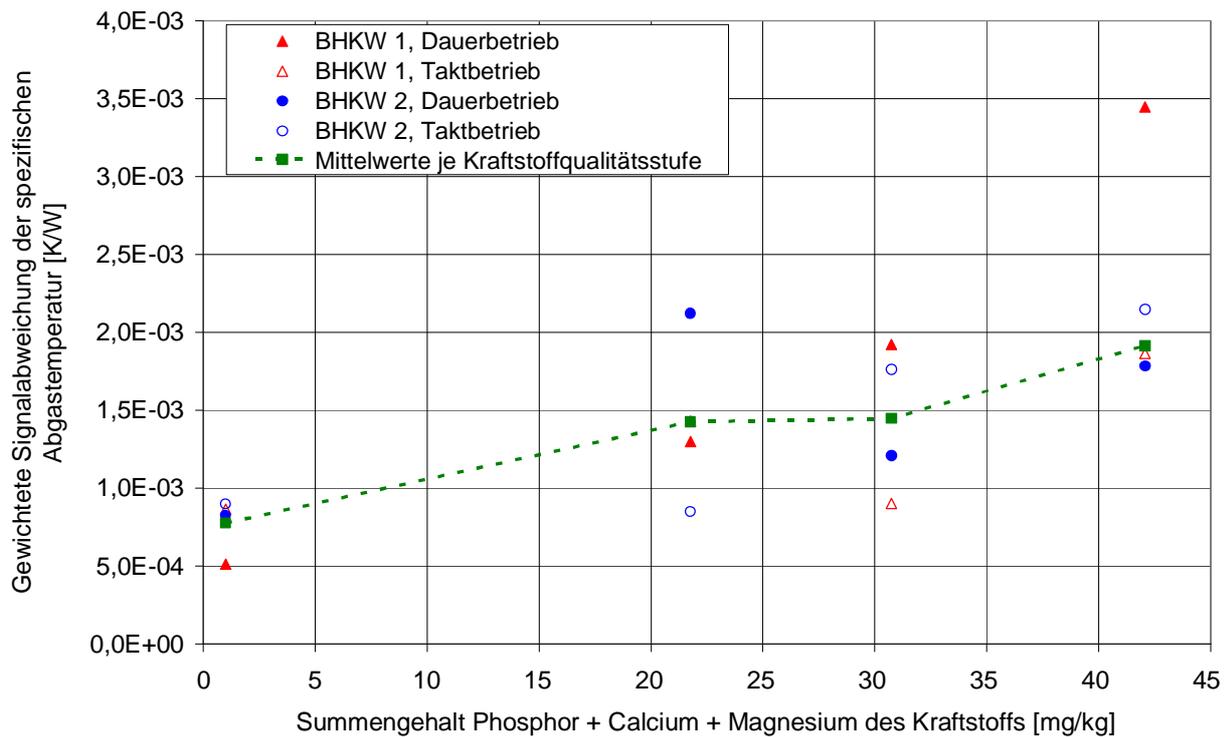


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen gewichteter Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur und Kraftstoffzusammensetzung

6.1.2 Emissionsverhalten

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Verläufe der spezifischen Abgastemperatur zeigen Phasen, in denen in kurzer Zeit eine starke Änderung des Betriebsverhaltens zu beobachten ist. Eine Auswahl dieser Phasen wird nachfolgend zusätzlich hinsichtlich des Emissionsverhaltens untersucht.

Durch die Betrachtung weiterer Messgrößen, welche von der zuvor ausgewerteten spezifischen Abgastemperatur unabhängig sind, ist es möglich, ein tieferes Verständnis der ablaufenden Vorgänge zu erlangen. Dadurch ergibt sich ein Gesamtbild des motorischen Verhaltens.

In den nachfolgenden Abbildungen sind dazu beispielhaft folgende an BHKW 1 aufgetretene Betriebszustände dargestellt:

- Normalbetrieb, inklusive einer DPF-Regenerationsphase
- Kontinuierlicher Ablagerungsaufbau
- Ablagerungsabbau

Abbildung 51 zeigt eine Phase störungsfreien Normalbetriebs inklusive DPF-Regeneration beim Betrieb mit RÖK 1. Zu erkennen ist, dass von 2:11 bis 2:23 eine Regeneration des Partikelfilters durchgeführt wurde. Sowohl während des normalen Betriebs als auch während der DPF-Regeneration treten bei konstanter Regelstangenposition zyklische Leistungsschwankungen im Bereich von ca. ± 50 W und einer Periodendauer von ca. 150 s auf. Diese stehen nicht in Zusammenhang mit Brennumlagerungen, sondern resultieren vermutlich aus der kontinuierlichen Drehung eines leicht belegten Einlassventils.

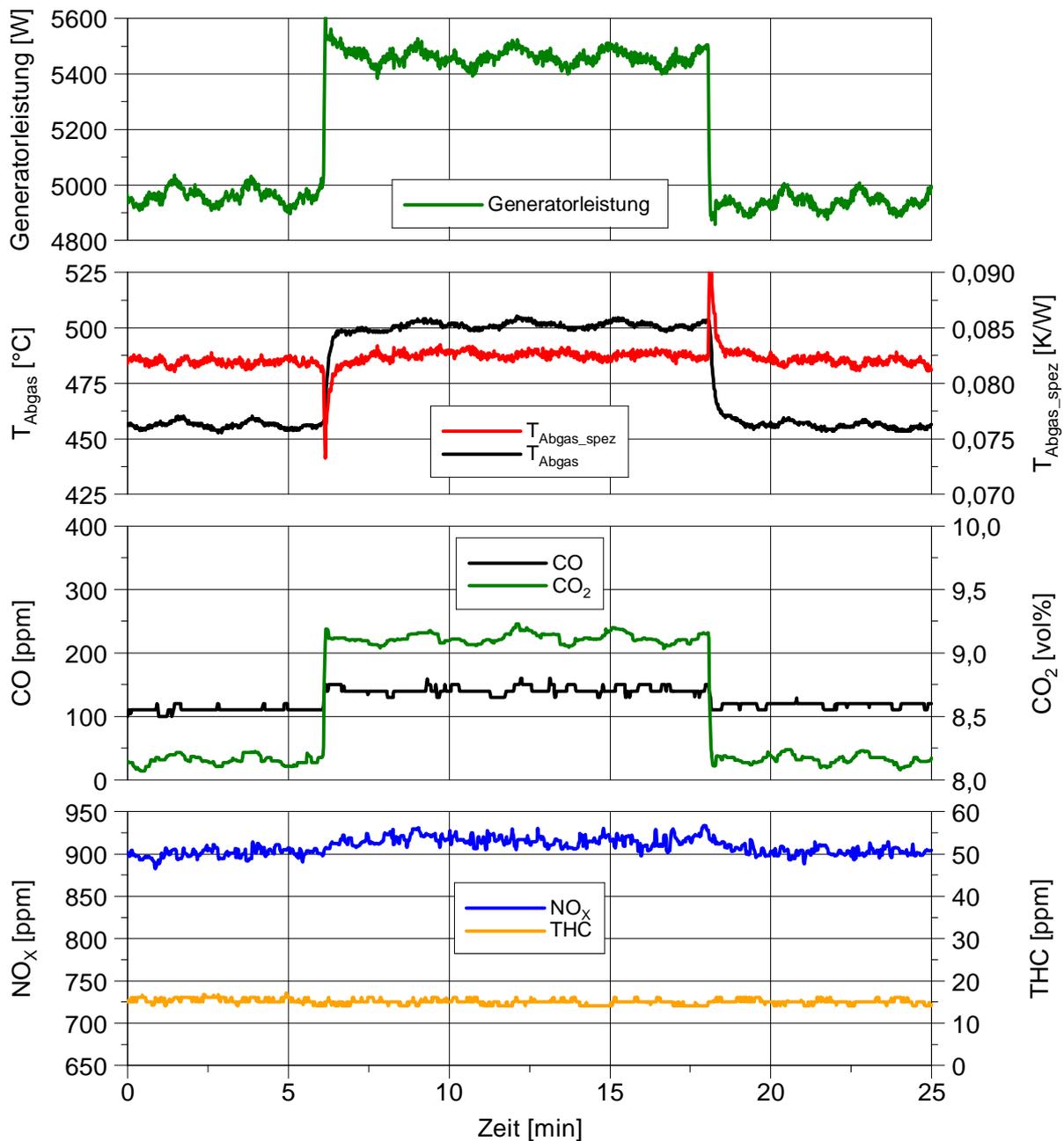


Abbildung 51: Emissionsverhalten bei störungsfreiem Normalbetrieb

In Abbildung 52 ist ein Zeitraum von 9 min kontinuierlichen Aufbaus von Ablagerungen beim Betrieb mit RÖK 3 dargestellt. Der sägezahnartige Verlauf der Generatorleistung zeigt, wie bei konstanter Regelstangenposition die Generatorleistung jeweils um ca. 200 W/min abfällt. Bei Erreichen der Mindestleistung (4850 W) wird durch einen Eingriff des BHKW-Reglers die Einspritzmenge erhöht, woraus ein Sprung der beobachteten Größen Generatorleistung, spezifische Abgastemperatur und CO₂-Emissionen resultiert.

Über den beobachteten Zeitraum ist weiterhin ein kontinuierlicher Anstieg der CO-Emissionen um ca. 40 % und der THC-Emissionen um 15 % zu verzeichnen. Die NO_x-Emissionen sinken im selben Zeitraum um ca. 4 %.

Als Ort des Ablagerungsaufbaus wird der Brennraum vermutet, da Beladungsvorgänge im Abgasmachbehandlungssystem generell deutlich langsamer ablaufen.

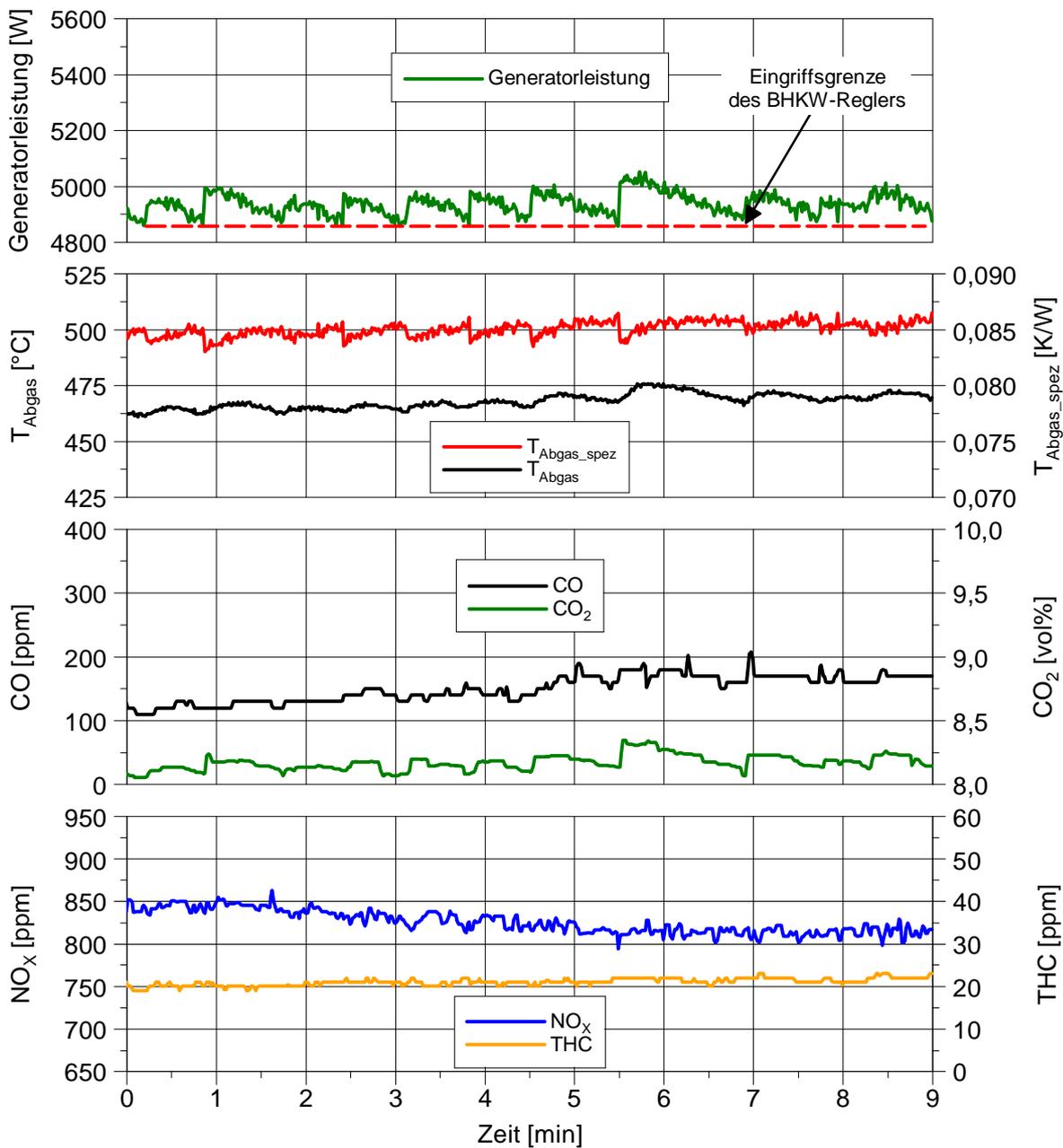


Abbildung 52: Emissionsverhalten bei kontinuierlichem Aufbau von Ablagerungen

Abbildung 53 zeigt einen sprunghaften Abbau von Ablagerungen während des Betriebs mit RÖK 4. Der Abbau vollzog sich innerhalb von ca. 6 s, erkennbar am sprunghaften Anstieg der Generatorleistung. Dadurch wurde die obere Grenze des tolerierten Leistungsbereichs erreicht und durch den BHKW-Regler die Einspritzmenge reduziert. Der Ablagerungsabbau führte zu einer Reduzierung der Abgastemperatur um 10 K (ca. 2 %), der CO_2 -Emissionen um 2,5 % und der CO-Emissionen um 27 %, trotz einer um ca. 1 % höheren Generatorleistung. Weiterhin ist nach dem Ablagerungsabbau ein deutlich gleichmäßigerer Motorlauf erkennbar. Aufgrund des kurzen Zeitraums ist der Ablagerungsaufbau eindeutig im Brennraum zu lokalisieren.

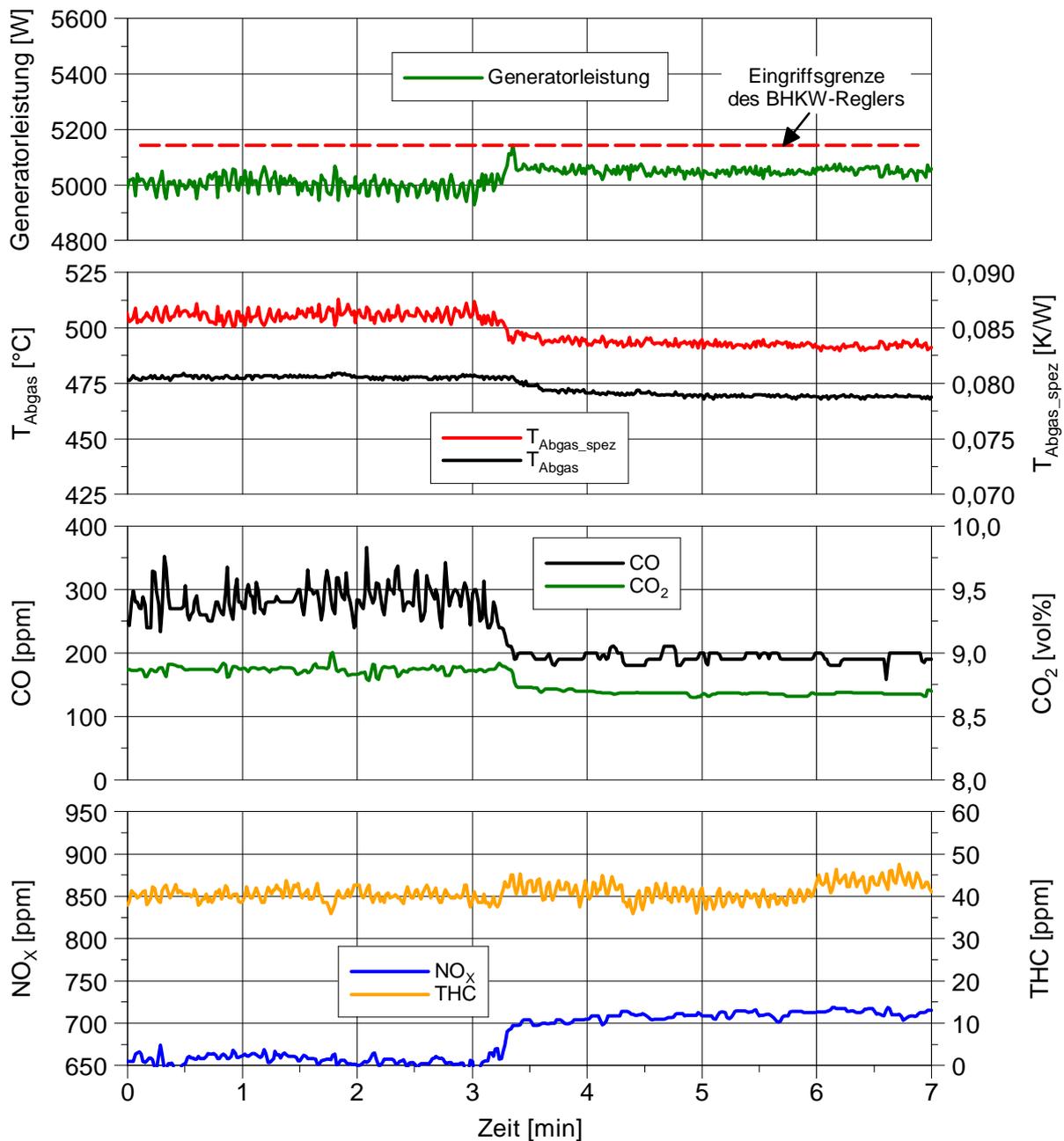


Abbildung 53: Emissionsverhalten bei sprunghaftem Abbau von Ablagerungen

Sowohl der beobachtete Ablagerungsaufbau als auch der sprunghafte Abbau von Ablagerungen werden dem Kraftstoff zugeschrieben. Die dargestellten Ereignisse können als allgemeingültig für die Beschreibung der durch Ablagerungsauf- und Abbau im Brenraum hervorgerufenen Änderungen des Emissionsverhaltens betrachtet werden. Aus diesem Grund wird auf die Darstellung weiterer Emissionsverläufe verzichtet.

Die dargestellten Beispiele verdeutlichen auch die Notwendigkeit zur kontinuierlichen Datenerfassung bei der Beurteilung von Ablagerungsbildung. Diskontinuierlich in Intervallen erfasste Daten können kein vollständiges Bild über die auftretenden Effekte liefern. Gleichzeitig sind insbesondere Emissionsmessungen sehr kostspielig, was zu einem Zielkonflikt bei der Definition der Versuchs- und Messumfänge führt.

6.1.3 Bauteilbetrachtung

Nach der Beurteilung des Betriebs- und Emissionsverhaltens erfolgt eine Befundung der von Ablagerungsbildung betroffenen Bauteile im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem.

6.1.3.1 Partikelfilter

Die untersuchten BHKW sind mit unbeschichteten geschlossenen keramischen Partikelfiltern ausgestattet (s. Tabelle 7, Kapitel 5.1).

Während der Langzeitprüfläufe wurden die Partikelfilter in der Regel täglich (d. h. im Dauerbetrieb nach 24 bzw. im Taktbetrieb nach 12 Betriebsstunden) ausgebaut, gewogen und anschließend wieder eingebaut. Die nachfolgende Abbildung 54 zeigt den auf diese Weise ermittelten Beladungsverlauf.

Bei dem erhöhten Messwert der Reihe RÖK 4 (BHKW 2) zum Zeitpunkt 166 Betriebsstunden handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um einen Messfehler.

Beim Betrieb des BHKW 1 mit RÖK 4 musste nach ca. 375 Betriebsstunden der Partikelfilter getauscht werden, da die Abgastemperatur aufgrund des hohen Abgasgedrucks über den maximal zulässigen Wert hinaus angestiegen war.

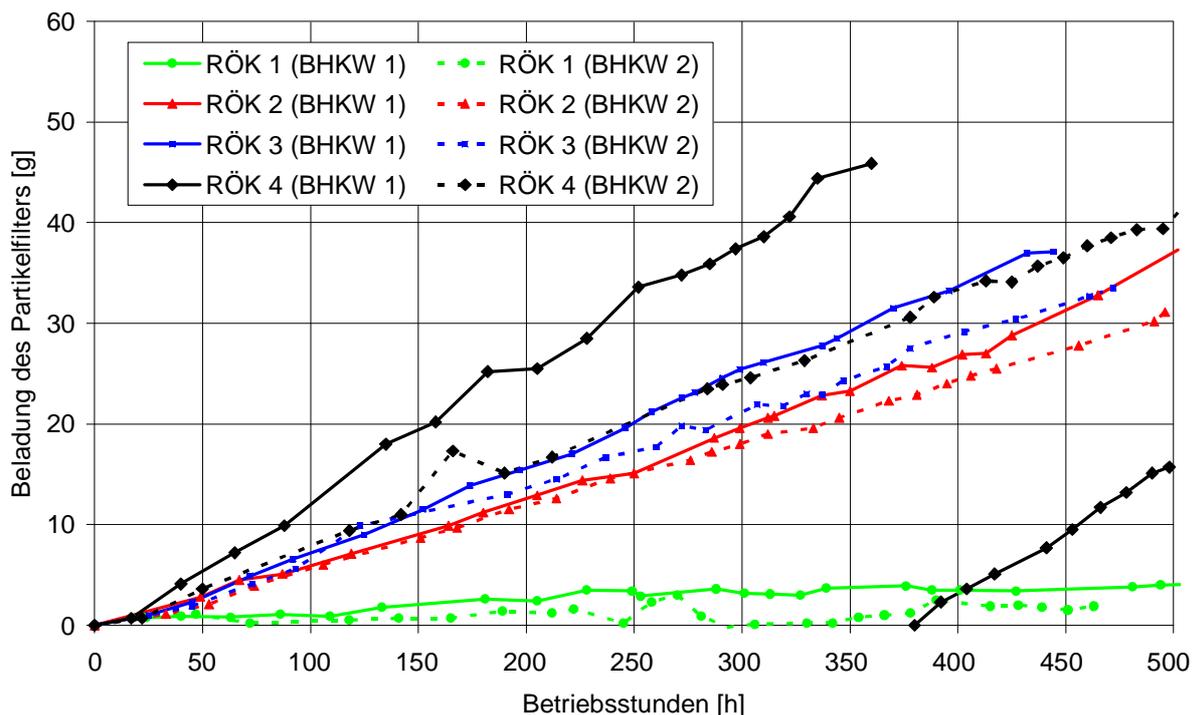


Abbildung 54: Beladung des Partikelfilters bei unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten

Bei allen Prüfläufen konnte eine kontinuierliche, nicht reversible Beladung über der Dauer des Prüflaufs beobachtet werden. Der Gradient der Beladung steht dabei in direktem Zusammenhang mit dem Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium im Kraftstoff.

Der Beladungsverlauf der Prüfläufe mit RÖK 1 und RÖK 2 ist dabei bei beiden BHKW im Rahmen der Messgenauigkeit vergleichbar. Bei den Prüfläufen mit RÖK 3 und RÖK 4 ist ein deutlicher Unterschied im Gradient der Beladung zwischen BHKW 1 und BHKW 2 zu erkennen, der

Beladungsanstieg verläuft bei BHKW 2 flacher. Dieser Unterschied ist bei RÖK 4 deutlich stärker ausgeprägt.

Die Ursache für diesen Unterschied zwischen BHKW 1 und BHKW 2 konnte nicht eindeutig geklärt werden. Der durch tägliche Schmierölstandsmessungen ermittelte Schmierölverbrauch lag bei allen durchgeführten Prüfläufen auf einem sehr niedrigen Niveau ($< 0,4 \text{ g/kWh}_{\text{el}}$). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass während des Betriebs ein kontinuierlicher Eintrag von Rapsölkraftstoff in den Schmieröltank erfolgt, wodurch ein Teil des Schmierölverbrauchs kompensiert wird. Der Rapsölanteil im Schmieröl betrug nach den Prüfläufen zwischen 1,2 Massen-% und 4,1 Massen-%. Aufgrund der Genauigkeit der Ölstandsmessung und des Analyseverfahrens zur Bestimmung des Rapsölanteils ist die Bestimmung des tatsächlichen Schmierölverbrauchs nur eingeschränkt möglich.

Wie Abbildung 55 zeigt, ist dennoch bei beiden BHKW der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Filterbeladungsrate und Gehalt an ablagerungsbildenden Komponenten im Kraftstoff gegeben. Die beschriebene Unsicherheit bei der Bestimmung der über das Schmieröl eingetragenen ablagerungsbildenden Komponenten kann bei gleichbleibendem Kraftstoffeinfluss zu einer Abweichung der mittleren Beladungsrate von bis zu 30 % führen. Da die eingesetzten Partikelfilter nach den Prüfläufen keine erkennbaren Schädigungen aufwiesen, ist zu vermuten, dass die zwischen den beiden BHKW teilweise unterschiedlichen Beladungsraten aus unterschiedlichen Schmierölverbräuchen resultieren.

Die Beladungsrate beider beim Betrieb des BHKW 1 mit RÖK 4 eingesetzten Partikelfilter liegt auf einem vergleichbaren Niveau.

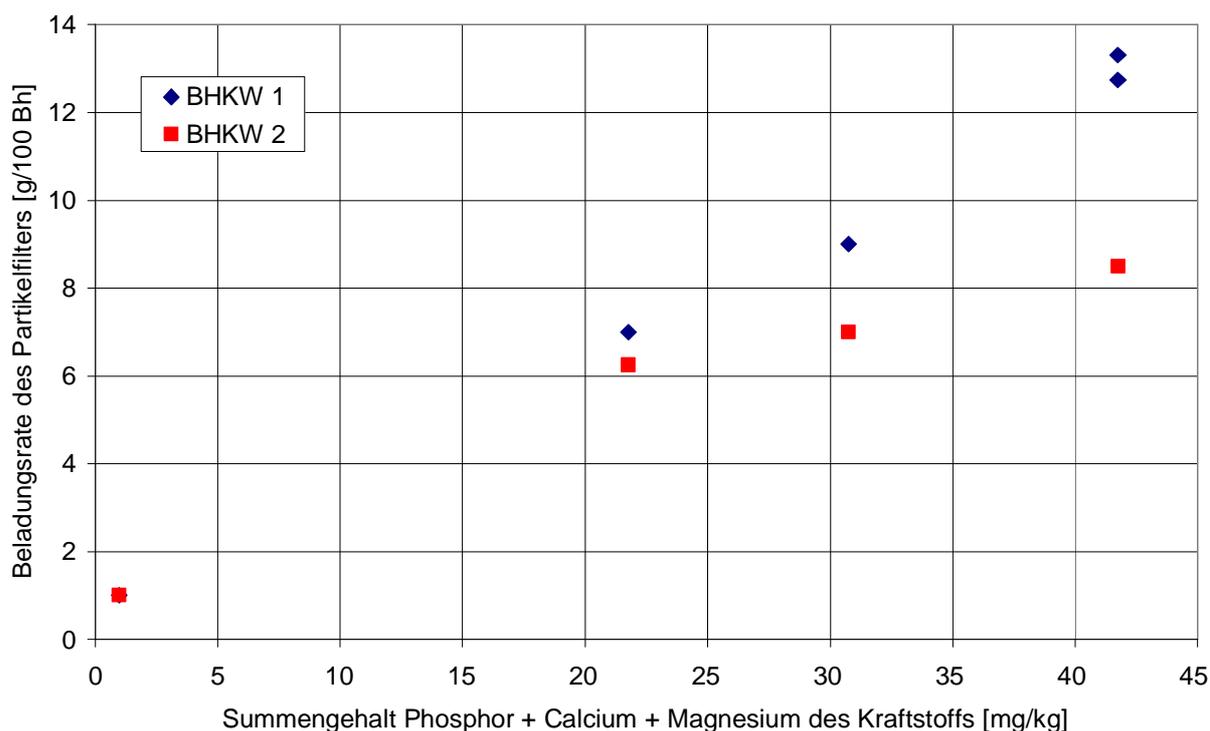


Abbildung 55: Beladungsrate des Partikelfilters in Abhängigkeit der Kraftstoffzusammensetzung

Die nachfolgende Abbildung 56 zeigt den Differenzdruck über den Partikelfilter in Abhängigkeit von der Beladungsmasse für die Prüfläufe mit RÖK 2 und RÖK 3. Der grundsätzliche Zusammenhang beider Größen ist gut zu erkennen, die exemplarisch dargestellten Prüfläufe zeigen ein vergleichbares Verhalten. Die Streubreite des Differenzdrucks bei gleicher Beladungsmasse resultiert mit hoher Wahrscheinlichkeit aus ungleichmäßiger Beladung (Pfropfenbildung am Kanalende bzw. Wandanlagerung) [52] [136].

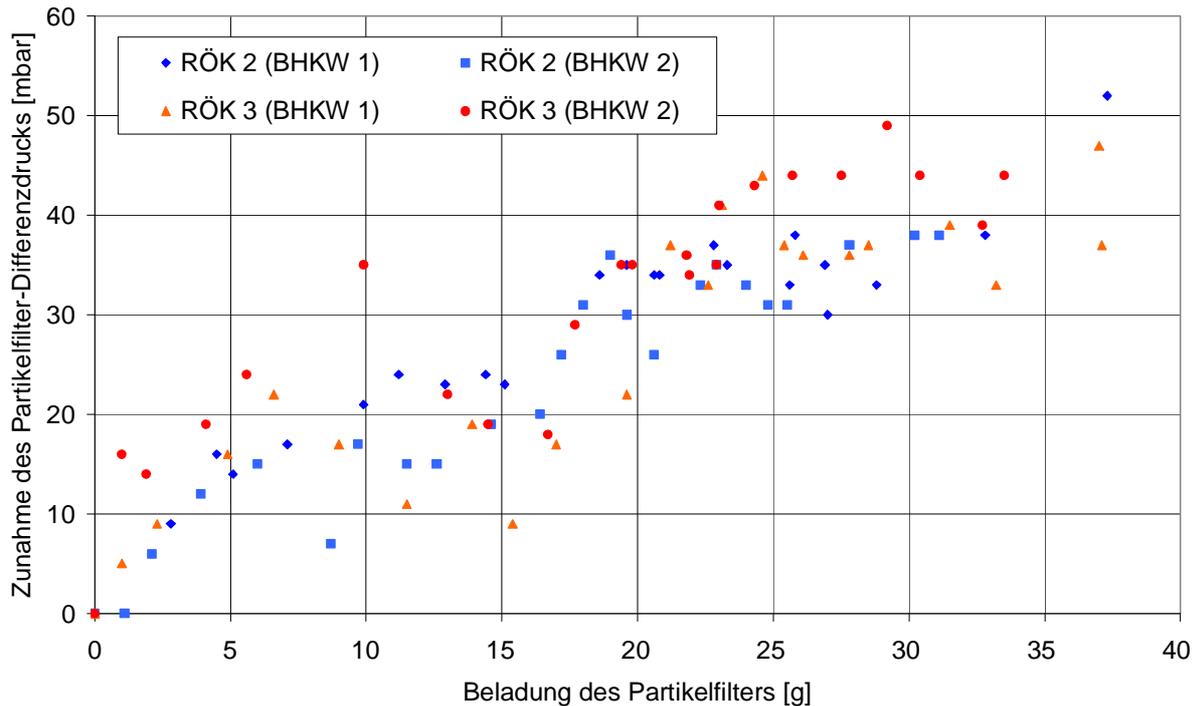


Abbildung 56: Zusammenhang zwischen Beladungsmasse und Differenzdruck über den Partikelfilter

Zur Verifizierung der ungleichmäßigen Beladung wurde ein stark beladener Partikelfilter am Ende des Prüflaufs geöffnet und die Filterkeramik entlang ihrer Längsachse in zwei Hälften aufgetrennt. In Abbildung 57 ist die Anströmseite der einen und die Abströmseite der anderen Hälfte zum Vergleich dargestellt. Abbildung 58 zeigt die sowohl am Kanalende als auch an der Kanalwand anhaftende Aschebeladung, Abbildung 59 eine Detailaufnahme der Anströmseite. Insbesondere die deutlich sichtbaren Ablagerungen entlang der Kanalwände haben einen starken Einfluss auf den Differenzdruck. [53] Es ist nicht auszuschließen, dass im Rahmen eines Rußabbrands auch Asche von den Kanalwänden gelöst wird und sich am Kanalende wieder ablagert.

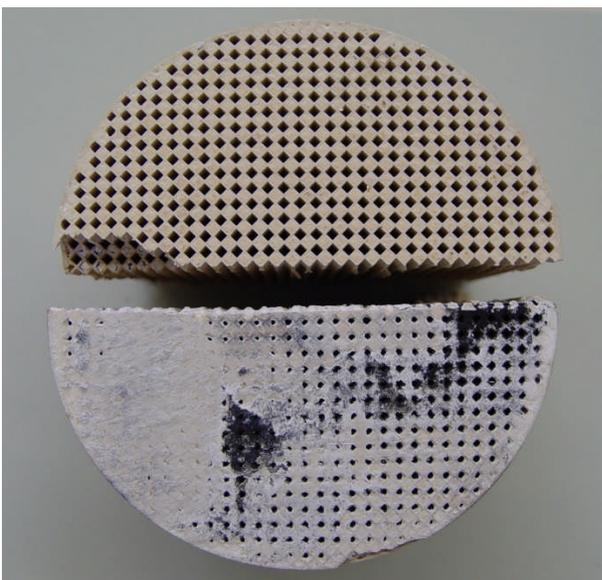


Abbildung 57: An- und Abströmseite eines stark beladenen DPF im Vergleich



Abbildung 58: Längsschnitt durch einen stark beladenen DPF



Abbildung 59: Detail der Anströmseite eines stark beladenen DPF

Die Befundung der durch den Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffzusammensetzungen beladenen Partikelfilter ergibt folgende Ergebnisse:

- Im DPF abgelagerte Aschen reduzieren die für den Gasdurchtritt verfügbaren Wandflächen und sorgen somit für einen Anstieg der Druckdifferenz über den Filter.
- Der Verlauf der Änderung der Druckdifferenz ist aufgrund der inhomogenen Beladung des Filters großen Schwankungen unterworfen und nur tendenziell prognostizierbar.
- Die Massenzunahme des Filters ist bei bekannter Kraftstoffzusammensetzung gut prognostizierbar. Die Massenzunahme läuft langsam und gleichmäßig ab.
- Der Beladungsvorgang ist nicht reversibel.

6.1.3.2 Einspritzdüse

Die mit den unterschiedlichen Versuchskraftstoffen betriebenen Einspritzdüsen wurden nach Ende des jeweiligen Prüflaufs visuell und geometrisch beurteilt. Während der Langzeitprüfläufe wurde am Ende der Dauerlaufphase vor Beginn der Takt-Phase jeweils eine neue Einspritzdüse eingesetzt, so dass von jedem dieser Prüfläufe zwei Einspritzdüsen zur Beurteilung zur Verfügung standen.

Eine funktionale Beurteilung von Einspritzdüsen außerhalb des Brennraums ist grundsätzlich schwierig, da die Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur) in der Regel nicht denen im Motorbetrieb entsprechen. Mit üblichen Düsenprüfgeräten können lediglich grobe Aussagen zu Öffnungsdruck, Spritzbild und Dichtheit getroffen werden.

Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Beurteilung der Einspritzdüsen war es, den Ablagerungsaufbau zu qualifizieren und soweit möglich auch zu quantifizieren. Mögliche Auswirkungen der Ablagerungen auf die Funktion der Einspritzdüse und deren Auswirkungen auf den Motorbetrieb standen an dieser Stelle im Hintergrund. Eine detaillierte Betrachtung der Auswirkungen von Ablagerungsvorgängen an der Einspritzdüse erfolgt in Kapitel 7.4 und 7.5.

In Anhang B sind die der visuellen Befundung zugrunde liegenden Ablagerungsbilder zusammengefasst. Die Abbildungen zeigen für jede der in den Langzeitprüfläufen mit DPF eingesetzten Einspritzdüsen folgende Ansichten:

- „von vorne“: Blick von vorn entlang der Düsenlängsachse auf die Einspritzdüsen spitze, Ausrichtung der Einspritzdüse um ihre Längsachse entsprechend der Einbaulage im Brennraum (oben = oben, links = Einlassseite, rechts = Auslassseite)
- „von innen“: Blick „aus Sicht der Düsennadel“ mittels eines Boroskops von innen entlang der Düsenlängsachse in Richtung der Einspritzdüsen spitze
- „Einlass“: Ansicht der dem Einlassventil zugewandten Seite der Einspritzdüse unter 45° zur Düsenlängsachse
- „unten“: Ansicht der in montiertem Zustand im Brennraum nach unten weisenden Seite der Einspritzdüse unter 45° zur Düsenlängsachse
- „Auslass“: Ansicht der dem Auslassventil zugewandten Seite der Einspritzdüse unter 45° zur Düsenlängsachse
- „oben“: Ansicht der im montiertem Zustand im Brennraum nach oben weisenden Seite der Einspritzdüse unter 45° zur Düsenlängsachse

Insbesondere feuchte Kraftstoffrückstände auf und in den Einspritzdüsen führen zu Reflektionen, welche die Beurteilung erschweren. Um die Beläge für weitere Untersuchungen nicht zu zerstören, konnten die Düsen jedoch nur sehr vorsichtig und damit nicht in jedem Fall vollständig getrocknet werden.

Die Aufnahmen zeigen in allen Fällen einen deutlichen Unterschied zwischen der Ablagerungsbildung bei RÖK 1 im Vergleich zu RÖK 2 bis RÖK 4. Innerhalb der Kraftstoffe RÖK 2 bis RÖK 4 ist weiterhin ein schwacher Zusammenhang der Ablagerungsbildung mit dem Gehalt an Phosphor sowie Calcium und Magnesium zu erkennen. Abbildung 60 zeigt dies beispielhaft anhand der Einspritzdüsen aus den Dauerlauf-Prüfläufen mit BHKW 2

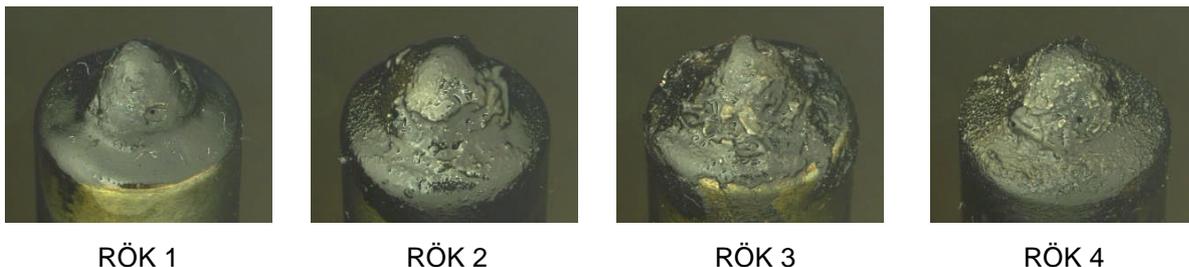


Abbildung 60: Abhängigkeit der Einspritzdüsenbeläge von der Kraftstoffqualität

In der Draufsicht („von vorne“) (Abbildung 61) ist unabhängig vom Betriebsprofil eine leichte Tendenz zu vermehrter Ablagerungsbildung in Richtung des Auslassventils (im Bild rechts) erkennbar. Insbesondere die schräge Fläche zwischen Düsenkuppe und Düsenchaft erscheint rauer (Beispiele aus BHKW 2).

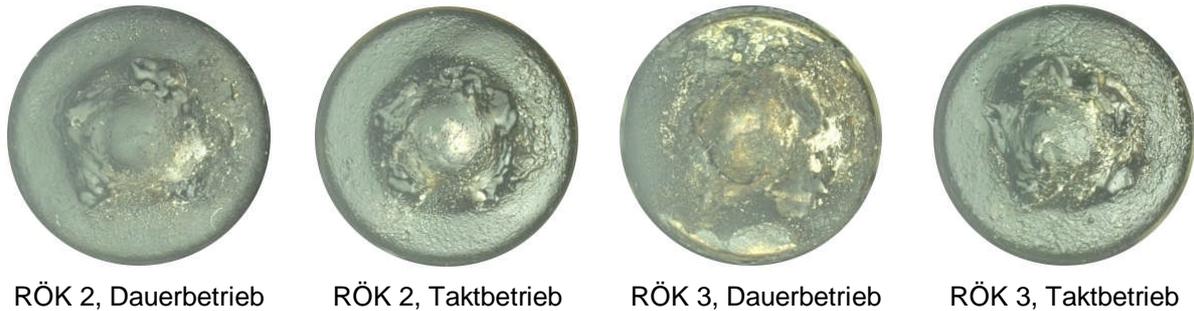


Abbildung 61: Abhängigkeit der Einspritzdüsenbeläge von der Orientierung im Brennraum

In den zwei Fällen „BHKW 1, RÖK 3, Taktbetrieb“ und „BHKW 2, RÖK 3, Dauerbetrieb“ sind vermutlich durch Unachtsamkeit beim Ausbau Ablagerungen an den Düsen spitzen entfernt worden. Ein Abplatzvorgang während des Betriebs des Motors (wie in Kapitel 6.1 beschrieben) bis auf das Grundmaterial ist äußerst unwahrscheinlich. Gleiches gilt auch für metallisch blanke Flächen am Übergang von der Düsen spitze auf den Düsen schaft (z. Bsp. „BHKW 1, RÖK 4, Dauerbetrieb“). Dort anhaftende Ablagerungen werden bei der Demontage der Düsenhalterkombination aus dem Motor an der Kante der Einspritzdüsenbohrung abgestreift (Abbildung 62).



Abbildung 62: Bei der Demontage verursachter Abbruch von Ablagerungen

Die Beläge in der Einspritzdüse zeigen bei BHKW 1 (Abbildung 63) sowohl eine Abhängigkeit vom verwendeten Kraftstoff als auch dem Betriebsprofil. Während bei den Dauerlauf-Düsen lediglich gold-braune Beläge erkennbar sind, sind die Düsen aus den Takt-Phasen der Prüfläufe überwiegend schwarz belegt.

Bei BHKW 2 (Abbildung 64) stellt sich die Situation trotz gleicher Einspritzdüsen und gleichem Versuchsablauf anders dar. Hier sind – wiederum mit Ausnahme der RÖK 1-Düsen – sämtliche Düsen innen schwarz belegt, unabhängig des Betriebsprofils.

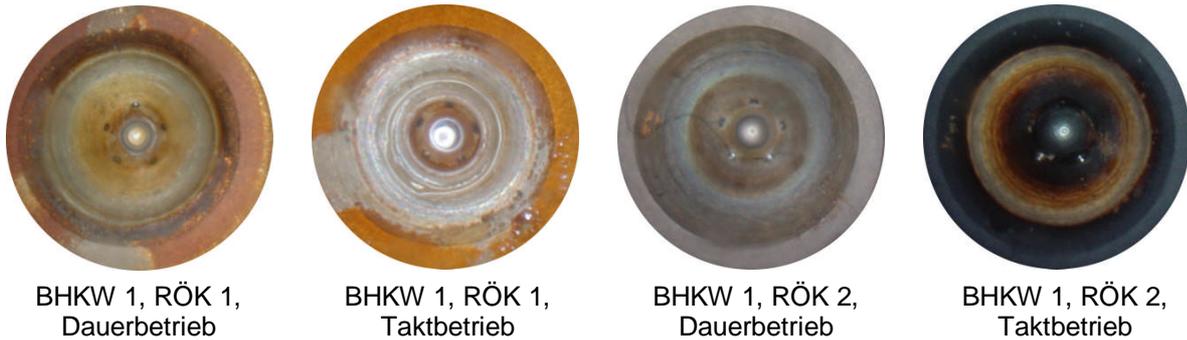


Abbildung 63: Ablagerungen in der Einspritzdüse (BHKW 1)

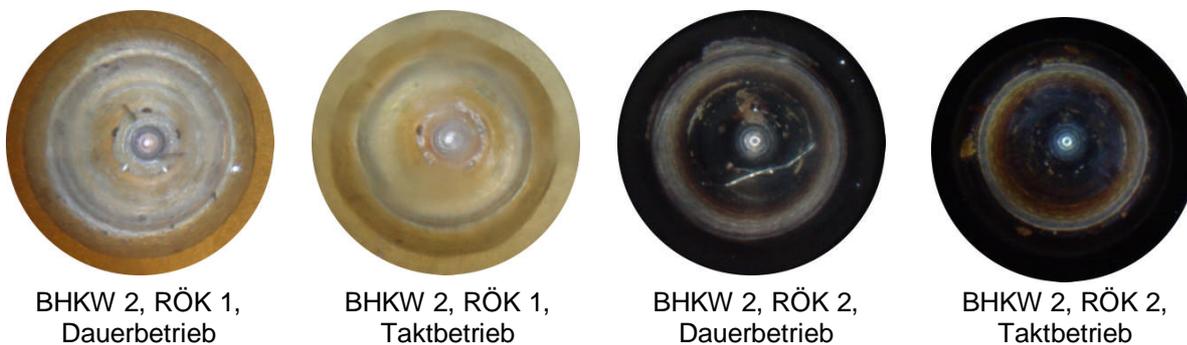


Abbildung 64: Ablagerungen in der Einspritzdüse (BHKW 2)

Die Ursache für dieses Phänomen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Das generell unterschiedliche Verhalten zwischen BHKW 1 und BHKW 2 könnte seine Ursache theoretisch in Schmieröleintrag über die Einspritzpumpe bei BHKW 2 haben, aufgrund der zeitlichen Abfolge der Prüfläufe hätten in diesem Fall aber auch die mit RÖK 1 eingesetzten Einspritzdüsen derartige Beläge aufweisen müssen.

Unklar ist weiterhin die Zusammensetzung sowie die grundsätzliche Ursache dieser Beläge. Bei den eingesetzten Einspritzdüsen handelt es sich um Sitzlochdüsen, d.h. die Abdichtung erfolgt direkt im Bereich der Düsenlöcher. Es erscheint möglich, dass durch temporäre Undichtigkeiten im Sitzbereich nach Ende des Einspritzvorgangs Verbrennungsgase (Ruß) in die Einspritzdüse strömen konnten und dort in Verbindung mit Kraftstoff einen schwarzen Belag bilden konnten.

Ob tatsächlich ein direkter Zusammenhang zwischen dem eingesetzten Kraftstoff und der Belagsbildung besteht oder ob die Belagsbildung in der Einspritzdüse eine Folge von Belagsbildung außen auf der Düsenkuppe und gegebenenfalls im Spritzloch und daraus resultierenden Undichtigkeiten (Sitzlochdüse) ist, ist unklar.

Auf den Abbildungen ist außerdem zu erkennen, dass die in der Einspritzdüse gebildeten Beläge sich flächig ablösen können (z. B. BHKW 1, RÖK 1, Taktbetrieb oder BHKW 2, RÖK 2, Dauerbetrieb). Dies kann verstopfte Düsenlöcher und/oder einen undichten Nadelsitz zur Folge haben.

In Tabelle 18 und Tabelle 19 sind die Profile der Düsenkuppen der in den 4 Langzeitprüfläufen eingesetzten Einspritzdüsen abgebildet. Zur Verdeutlichung des Ablagerungsaufbaus ist die Kontur einer unbeladenen Düsenkuppe als dünne Linie eingezeichnet.

Tabelle 18: Profilaufnahmen der Düsenkuppe der Einspritzdüsen der Prüfläufe (BHKW 1)

BHKW 1		Loch 1	Loch 2	Loch 3	Loch 4	Loch 5
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg; Ca + Mg < 0,5 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg; Ca + Mg = 12,1 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg; Ca + Mg = 15,0 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg; Ca + Mg = 20,5 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					

Tabelle 19: Profilaufnahmen der Düsenkuppe der Einspritzdüsen der Prüfläufe (BHKW 2)

BHKW 2		Loch 1	Loch 2	Loch 3	Loch 4	Loch 5
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg; Ca + Mg < 0,5 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg; Ca + Mg = 12,1 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg; Ca + Mg = 15,0 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg; Ca + Mg = 20,5 mg/kg	Dauerlauf					
	Takt 1/1					

Analog zur visuellen Betrachtung sind auch hier deutliche Unterschiede in der Belagsbildung mit RÖK 1 im Vergleich zu RÖK 2 bis 4 zu erkennen. Eine weitere Differenzierung der Ablagerungen anhand des Gehalts an Phosphor, Calcium und Magnesium ist nicht möglich.

Die Auswertung der Düsenprofile erfolgte durch Vergleich der Profilfläche mit einer Referenzfläche (unbeladene Düsenkuppe). Dabei wurden mittels einer Software die Anzahl der schwarzen Pixel in einem vordefinierten Bereich gezählt, um auf diese Art die Belagsbildung zu quantifizieren. Da insbesondere die beladenen Einspritzdüsen an der Düsen Spitze keine eindeutigen Bezugspunkte aufweisen, konnte der Bezugsbereich nicht anhand der jeweiligen Düsengeometrie neu ausgerichtet werden, sondern war in Bezug zum Aufbau der Düsen auf der Prüfvorrichtung starr gewählt. Dadurch spiegeln sich Toleranzen im Messaufbau direkt in der ermittelten Pixelanzahl wieder. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde für diesen Fehler anhand von Referenzmessungen mit 7 neuen Einspritzdüsen ein Wert von ca. 4,5 % ermittelt.

Die nachfolgenden Netzdiagramme (Abbildung 65 und Abbildung 66) zeigen die Größenverteilung der Ablagerungsprojektionen über den Umfang der Einspritzdüse. Zusätzlich zu den im jeweiligen BHKW betriebenen Einspritzdüsen ist eine Referenzdüse mit eingetragen. Die Ausrichtung der Diagramme entspricht der Anordnung der Einspritzdüse im Brennraum (oben = oben, links = Einlassseite, rechts = Auslassseite).

Die y-Achse ist dimensionslos dargestellt, da die Maßeinheit der Auswertung ohne reale Bedeutung ist. Beide Diagramme weisen jedoch die gleiche Skalierung auf. Wesentlich wichtiger als der Absolutwert der Größe der Projektionsfläche ist der relative Unterschied zwischen den Spritzlöchern der einzelnen Einspritzdüsen sowie zwischen den Einspritzdüsen untereinander.

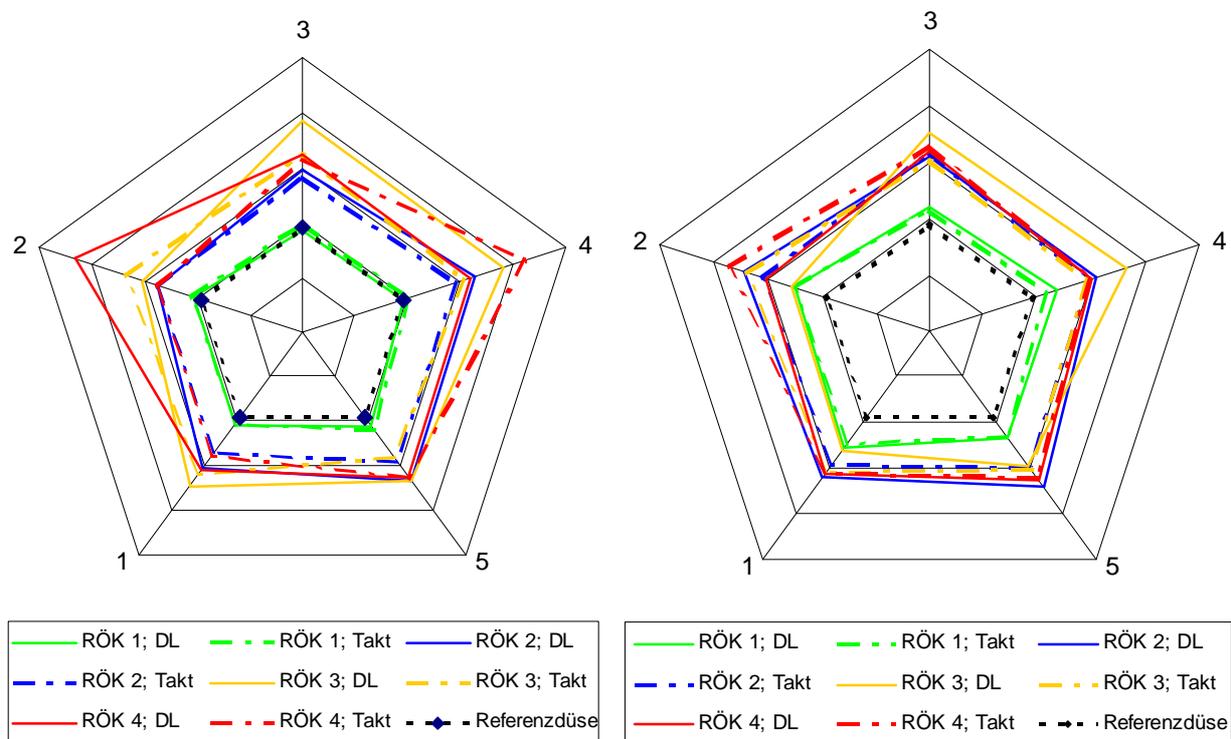


Abbildung 65: Verteilung der Projektionsflächen über den Einspritzdüsenumfang (BHKW 1)

Abbildung 66: Verteilung der Projektionsflächen über den Einspritzdüsenumfang (BHKW 2)

Bei der Verteilung der Ablagerungen um den Düsenumfang ist auffällig, dass Ausreißer hauptsächlich bei den Spritzlöchern 2 und 4 auftreten, kaum hingegen bei den Spritzlöchern 1 und 5. Ob dies mit der Lage der Spritzlöcher im Brennraum zusammenhängt (Loch 2 liegt direkt am Einlassventil, das annähernd gegenüberliegende Loch 4 direkt am Auslassventil) oder mit dem Höhenwinkel des Spritzlochs zur Düsenlängsachse (Loch 1 und 5: ca. 86° ; Loch 2 und 4: ca. 64° ; Loch 3: ca. 50°), ist nicht geklärt.

Ein eindeutiger Einfluss des Betriebsprofils auf die Größe der projizierten Fläche als Maß für den Grad der Ablagerung ist bei dieser Betrachtung nicht zu erkennen.

Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen die Abweichung der Größe der Projektionsfläche zur Referenzeinspritzdüse der einzelnen Einspritzdüsen, gruppiert nach den eingesetzten Kraftstoff und dem Betriebsprofil. Auch hier wurde wieder aus den bereits erwähnten Gründen auf eine Beschriftung der Y-Achse verzichtet. Die Skalierung ist in beiden Diagrammen jedoch einheitlich.

Abermals klar erkennbar ist der sehr große Unterschied zwischen RÖK 1 und RÖK 2 bis 4. Der bereits erwähnte schwach ausgeprägte Zusammenhang zwischen der eingesetzten Kraftstoffqualität RÖK 2 bis 4 und dem abgebildeten Ablagerungsaufbau ist – von einzelnen Ausreißern abgesehen – in beiden Diagrammen zu erkennen. Auffällig ist weiterhin der scheinbar positive Effekt des Taktbetriebs auf die Ablagerungsbildung bei BHKW 1. Ein ähnlicher Effekt ist bei BHKW 2 jedoch nicht erkennbar.

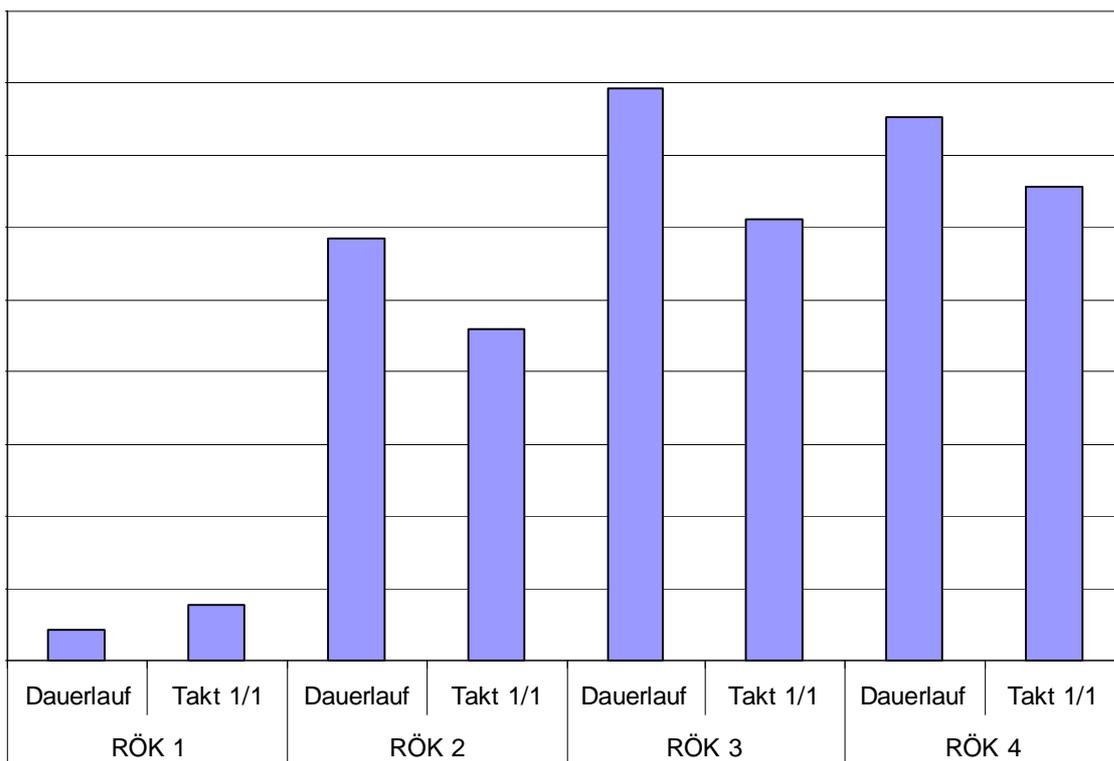


Abbildung 67: Differenz der Gesamt-Projektionsflächen zur Referenzeinspritzdüse (BHKW 1)

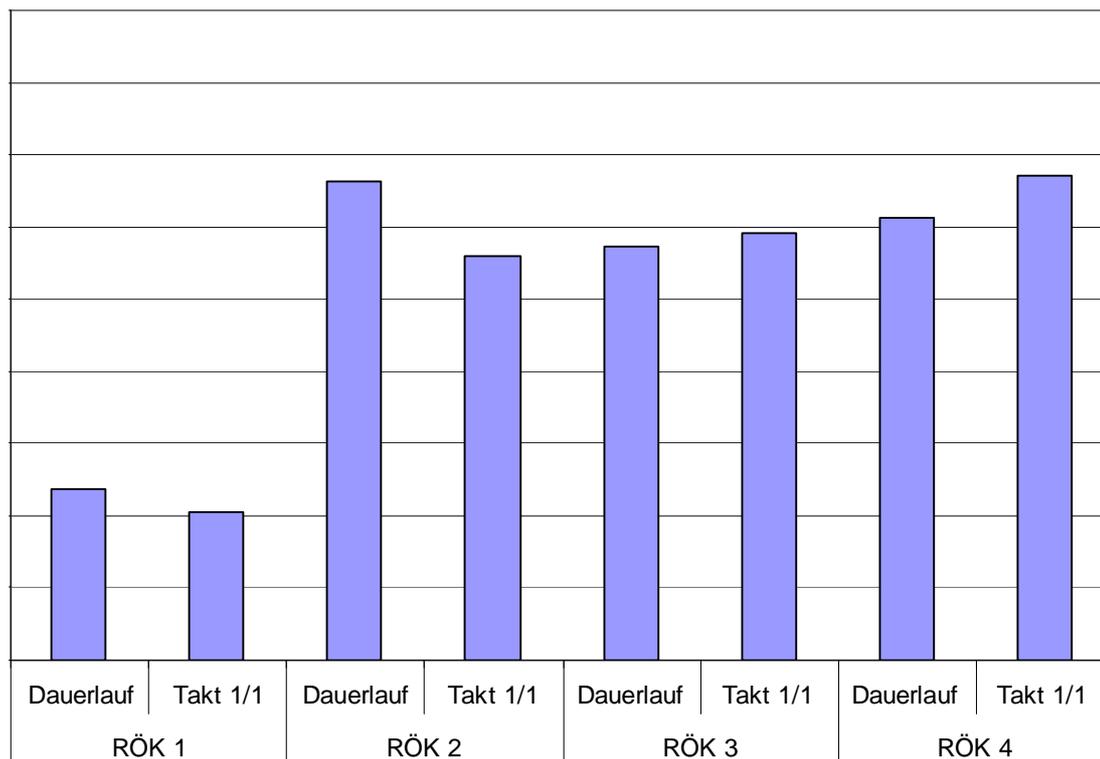


Abbildung 68: Differenz der Gesamt-Projektionsflächen zur Referenzeinspritzdüse (BHKW 2)

Die großen Unterschiede zwischen BHKW 1 und BHKW 2 bei der Verwendung von RÖK 1 sind in diesem Ausmaß aus den vorherigen visuellen Auswertungen nicht klar hervorgegangen und aus den Versuchsrandbedingungen zunächst nicht zu erwarten.

Neben der Unsicherheit des angewendeten Beurteilungsverfahrens zeigt dieser Unterschied möglicherweise auch die ausgeprägte Zufälligkeit von Ablagerungsbildungsvorgängen (siehe auch Kapitel 9).

6.1.3.3 Kolben/Ventile/Brennraumdecke

Im Vergleich zu Ablagerungen an der Einspritzdüse sind die Ablagerungen im Brennraum an Kolben, Ventilen und der Brennraumdecke zunächst unkritisch. Ablagerungen auf diesen Bauteilen bewirken aufgrund der Volumenänderung sowie des isolierenden Einflusses der Ablagerungen auf den Wandwärmeübergang in erster Linie eine (geringfügige) Änderung des Enddrucks in der Kompressionsphase.

Bei der Beurteilung von Brennraumablagerungen muss grundsätzlich zwischen

- Ablagerungen „in engen Spalten“ (Feuersteg/Düsenpalt) und
- Ablagerungen „auf der Fläche“

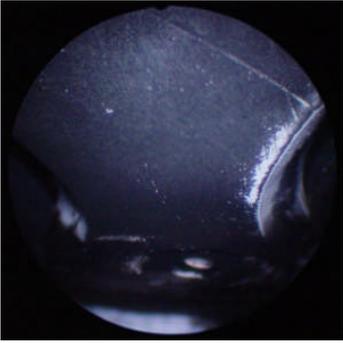
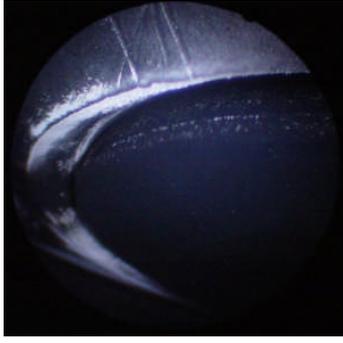
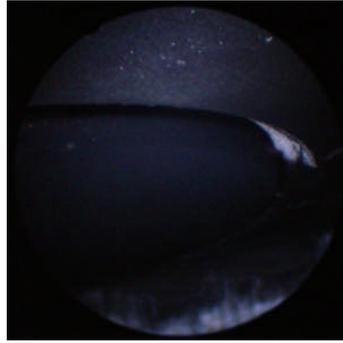
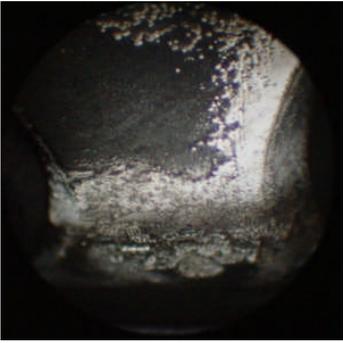
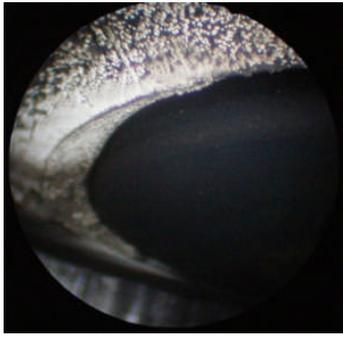
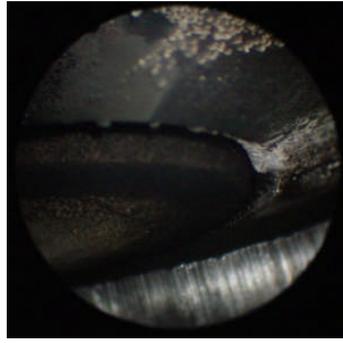
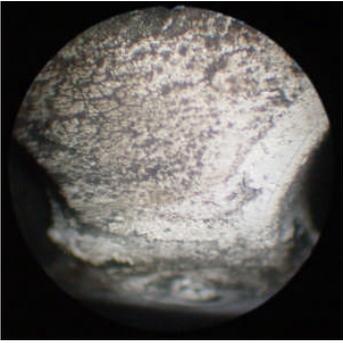
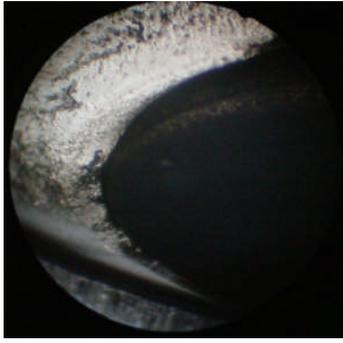
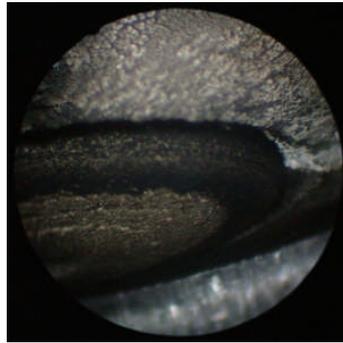
unterschieden werden.

Ablagerungen im Feuersteg und im Spalt der Einspritzdüsenbohrung bilden sich auch beim Betrieb mit mineralischen Kraftstoffen durch die unvollständige Verbrennung in diesen Randzonen des Brennraums (unverbrannte Kohlenwasserstoffe). Diese Ablagerungen sind von harter kompakter Struktur und haften in der Regel sehr gut an der jeweiligen Fläche (im Feuerstegbereich entweder am Kolben oder an der Laufbuchse).

Ablagerungen „auf der Fläche“ bestehen beim Betrieb mit mineralischen Kraftstoffen dagegen in der Regel aus einer hauchdünnen, leicht abwischbaren Rußschicht.

Mittels endoskopischer Untersuchungen nach den Betriebsphasen Einlaufen, Dauerbetrieb und Taktbetrieb lässt sich der Verlauf der Ablagerungsbildung über der Betriebsdauer beurteilen. Tabelle 20 zeigt am Beispiel des Betriebs von BHKW 1 mit RÖK 4 das Ablagerungswachstum in den Bereichen Ventilsteg, Einlassventil und Auslassventil.

Tabelle 20: Endoskopaufnahmen von Bereichen des Brennraums nach unterschiedlicher Betriebsdauer am Beispiel des Betriebs von BHKW 1 mit RÖK 4

	Ventilsteg	Einlassventil	Auslassventil
nach Einlaufen			
nach Dauerlauf			
nach Taktbetrieb			

Zu erkennen ist, dass die Schichtdicken der bis zum Ende der Dauerlaufphase gebildeten Beläge weiter anwachsen. Gleichzeitig breiten sich die Beläge auf weitere Stellen aus. Die Aufnahmen der anderen Prüfläufe zeigen ein ähnliches Verhalten, das abhängig von der Zusammensetzung des eingesetzten Kraftstoffs unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

Tabelle 21 und Tabelle 22 zeigen zunächst die direkt dem Brennraum zugewandten Bauteilseiten nach Ende der Langzeitprüfläufe im Überblick. Anschließend werden die Bauteile Einlassventil, Auslassventil und Kolben nochmals aus verschiedenen Ansichten detaillierter betrachtet.

Die visuelle Befundung zeigt – wie bereits bei den Einspritzdüsen – auch hier einen Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium im Kraftstoff sowie dem Ablagerungsbild auf Kolben, Ventilen und – etwas weniger ausgeprägt – auf der Brennraumdecke.

Bei BHKW 2 war der Ablagerungsaufbau beim Betrieb mit RÖK 4 so stark, dass eine Berührung von Kolben und Einlassventil stattgefunden hat (halbkreisförmiger Abdruck von Ablagerungen auf dem Einlassventilteller).

Tabelle 21: Visuelle Befundung von Brennraumdecke, Ventilen und Kolben (BHKW 1)

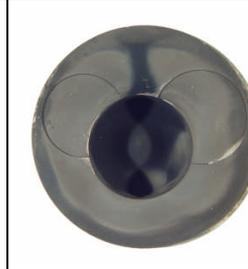
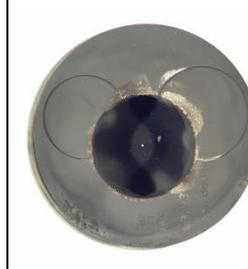
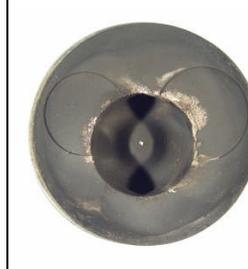
BHKW 1	Brennraumdecke	Ventilteller Einlassventil	Ventilteller Auslassventil	Kolbenboden mit Brennraummulde
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg Ca + Mg < 0,5 mg/kg				
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg Ca + Mg = 12,1 mg/kg				
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg Ca + Mg = 15,0 mg/kg				
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg Ca + Mg = 20,5 mg/kg				

Tabelle 22: Visuelle Befundung von Brennraumdecke, Ventilen und Kolben (BHKW 2)

BHKW 2	Brennraumdecke	Ventilteller Einlassventil	Ventilteller Auslassventil	Kolbenboden mit Brennraummulde
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg Ca + Mg < 0,5 mg/kg				
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg Ca + Mg = 12,1 mg/kg				
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg Ca + Mg = 15,0 mg/kg				
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg Ca + Mg = 20,5 mg/kg				

Der bereits bei der Auswertung des Betriebsverhaltens auffällige Prüflauf BHKW 2 – RÖK 1 zeigt auch bei der Bauteilbefundung ein von den anderen Prüfläufen abweichendes Bild. Wie bereits beschrieben, wurde dieser Prüflauf ca. 50 Betriebsstunden vor dem regulären Ende aufgrund einer vermuteten Undichte zwischen Brennraum und Kühlwassermantel beendet. In den Stillstandsphasen des Taktbetriebs konnte dadurch eine geringe Menge Kühlwasser in den Brennraum gelangen, welches beim nächsten Motorstart schlagartig verdampfte. Daraus resultieren vermutlich die auf den Ventilen und der Brennraumdecke erkennbaren hellen Flecken.

Bei der Befundung von Kolben und Brennraummulde ist auffällig, dass die aschehaltigen Ablagerungen nicht großflächig über die Bauteile verteilt sind, sondern nur punktuell in begrenzten Gebieten auftauchen. Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen beispielhaft an Kolben und Brennraumdecke des Prüflaufs BHKW 1 – RÖK 3 die theoretische Richtung der Einspritzstrahlen ohne Berücksichtigung des Luftdralls sowie die Richtung des Luftdralls.

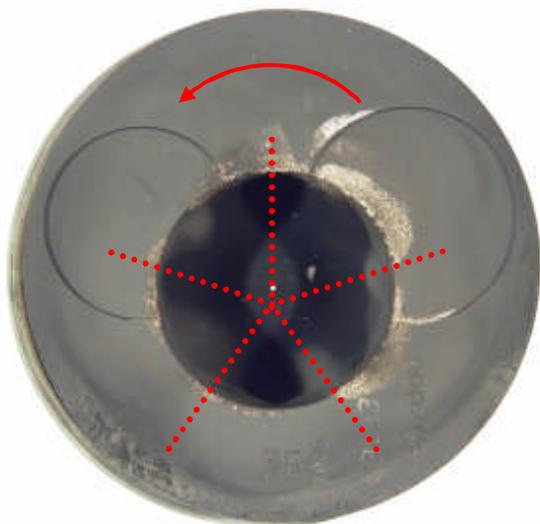


Abbildung 69: Theoretische Richtung der Einspritzstrahlen auf Pleuellring



Abbildung 70: Theoretische Richtung der Einspritzstrahlen auf Pleuellringfläche

Die Abbildungen zeigen, dass eine Verwehung der Einspritzstrahlen in der angenommenen Richtung zur Ablagerungsbildung an den mit Asche beladenen Stellen führen kann.

Neben dem Einfluss des Strahlbilds der Einspritzdüse ist auch ein Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Ablagerungsbildung möglich. Eine nähere Betrachtung dieses Einflusses erfolgt in Kapitel 8.2.2 für unterschiedliche Bereiche des Brennraums.

In Tabelle 23 und Tabelle 24 sind die Auslassventile beider BHKW aus den Prüfläufen mit RÖK 1 bis RÖK 4 dargestellt. Neben der bereits bekannten Ansicht der Brennraumseite des Ventiltellers ist zusätzlich die dem Brennraum abgewandte Seite aus 4 jeweils um 90° gedrehten Ansichten zu sehen.

Bei beiden BHKW zeigen die Ventilteller brennraumseitig eine von der Mitte ausgehende Beladung mit Asche. Die Größe der beladenen Fläche ist dabei vom verwendeten Kraftstoff abhängig. Je höher der Anteil an Phosphor, Calcium und Magnesium, desto größer ist der Durchmesser der beladenen Fläche (bei gleicher Laufzeit). Es wird vermutet, dass der Beladungsverlauf ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie beim Partikelfilter folgt.

Unterschiede zwischen beiden BHKW gibt es bei der Beladung der dem Brennraum abgewandten Seite der Ventile. Während bei BHKW 2 auch hier ein Einfluss der Kraftstoffqualität zu erkennen ist (von RÖK 2 nach RÖK 4 zunehmend weiß-graue Beläge), ist dies bei BHKW 1 nicht zu beobachten.

Das Ablagerungsbild bei BHKW 1 – RÖK 3 ist zwar mit dem von BHKW 2 – RÖK 3 vergleichbar, bei der Verwendung von RÖK 4 zeigt das Auslassventil aus BHKW 1 jedoch wieder deutlich weniger weiß-graue Beläge. Die Ursache dafür sowie ein eventueller Zusammenhang mit der unterschiedlichen Beladung der Partikelfilter (siehe Kapitel 6.1.3.1) konnte nicht geklärt werden.

Die Sitzflächen sind bei allen Ventilen leicht belegt, dadurch jedoch nicht in ihrer Funktion eingeschränkt. Derartige Beläge sind auch bei der Verwendung von mineralischen Kraftstoffen üblich.

Tabelle 23: Visuelle Befundung der Auslassventile (BHKW 1)

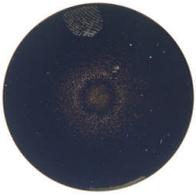
BHKW1	Ventilteller	Seite 1	Seite 2	Seite 3	Seite 4
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg Ca + Mg < 0,5 mg/kg					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg Ca + Mg = 12,1 mg/kg					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg Ca + Mg = 15,0 mg/kg					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg Ca + Mg = 20,5 mg/kg					

Tabelle 24: Visuelle Befundung der Auslassventile (BHKW 2)

BHKW 2	Ventilteller	Seite 1	Seite 2	Seite 3	Seite 4
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg Ca + Mg < 0,5 mg/kg					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg Ca + Mg = 12,1 mg/kg					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg Ca + Mg = 15,0 mg/kg					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg Ca + Mg = 20,5 mg/kg					

Entsprechend der Darstellung der Auslassventile sind in Tabelle 25 und Tabelle 26 die Einlassventile beider BHKW aus den Prüfläufen mit RÖK 1 bis RÖK 4 dargestellt

Ähnlich den Auslassventilen zeigen auch die Einlassventile auf der dem Brennraum zugewandten Seite des Ventiltellers eine von der Mitte ausgehende Beladung mit Asche, die bei gleicher Laufzeit direkt vom Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium im Kraftstoff abhängig ist. Vermutlich aufgrund der niedrigeren Temperaturen am Einlassventil ist die Ablagerungsbildung dort jedoch wesentlich weniger ausgeprägt.

Bei allen Ventilen aus den beiden BHKW sind die Ventilsitzflächen über den gesamten Umfang frei von Ablagerungen.

Bei BHKW 1 haben sich während der Prüfläufe mit RÖK 2 bis RÖK 4 Ölkohleablagerungen auf der dem Brennraum abgewandten Seite an Ventilteller und Ventilschaft gebildet. Diese sind jedoch unabhängig vom verwendeten Kraftstoff und vermutlich Bauteiltoleranzen im Ölabscheider der Blow-By-Gase bzw. der Ventilschaftdichtung zuzuschreiben. Diese Ölkohleablagerungen deuten zunächst auf einen erhöhten Schmierölverbrauch hin. Wie in Kapitel 6.1.3.1 beschrieben, kann dies jedoch nicht eindeutig geklärt werden.

Tabelle 25: Visuelle Befundung der Einlassventile (BHKW 1)

BHKW 1	Ventilteller	Seite 1	Seite 2	Seite 3	Seite 4
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg Ca + Mg < 0,5 mg/kg					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg Ca + Mg = 12,1 mg/kg					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg Ca + Mg = 15,0 mg/kg					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg Ca + Mg = 20,5 mg/kg					

Tabelle 26: Visuelle Befundung der Einlassventile (BHKW 2)

BHKW 2	Ventilteller	Seite 1	Seite 2	Seite 3	Seite 4
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg Ca + Mg < 0,5 mg/kg					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg Ca + Mg = 12,1 mg/kg					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg Ca + Mg = 15,0 mg/kg					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg Ca + Mg = 20,5 mg/kg					

Bei BHKW 2 weisen die in den Prüfläufen mit RÖK 1 bis RÖK 3 eingesetzten Einlassventile Ölkohleablagerungen am Ventilschaft auf. Auch hier ist ein Einfluss der verwendeten Kraftstoffqualität unwahrscheinlich, vielmehr wird eine ungenügende Ölabscheidung des Blow-By-Gases als Ursache vermutet. Mit Ausnahme von RÖK 1 ist die Belagsbildung bei BHKW 2 jedoch deutlich geringer als bei BHKW 1. Ein Einfluss dieses vermutlich erhöhten Eintrags von Schmieröl in den Brennraum auf das Beladungsverhalten des Partikelfilters konnte nicht festgestellt werden (siehe Kapitel 6.1.3.1).

In Tabelle 27 und Tabelle 28 ist der Zustand der Kolben und Kolbenringe nach den jeweils 4 Prüfläufen der beiden BHKW dokumentiert.

Tabelle 27: Visuelle Befundung der Kolben (BHKW 1)

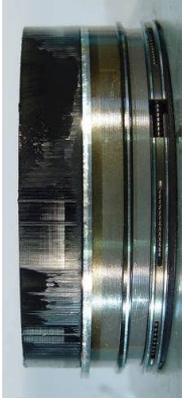
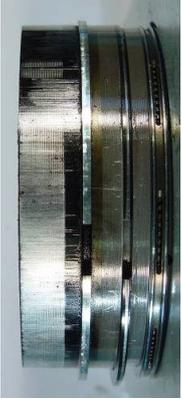
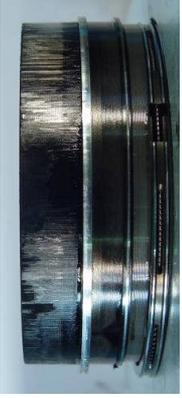
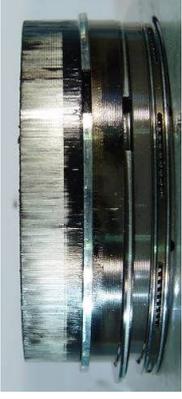
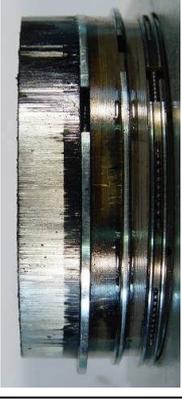
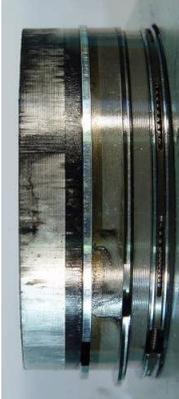
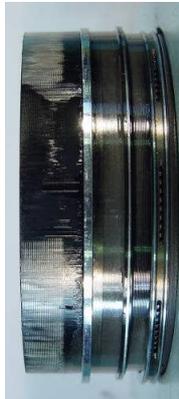
BHKW 1	Draufsicht	Seite 1	Seite 2	Seite 3	Seite 4
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg; Ca + Mg < 0,5 mg/kg					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg; Ca + Mg = 12,1 mg/kg					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg; Ca + Mg = 15,0 mg/kg					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg; Ca + Mg = 20,5 mg/kg					

Tabelle 28: Visuelle Befundung der Kolben (BHKW 2)

BHKW 2	Draufsicht	Seite 1	Seite 2	Seite 3	Seite 4
RÖK 1 P < 0,5 mg/kg; Ca + Mg < 0,5 mg/kg					
RÖK 2 P = 9,5 mg/kg; Ca + Mg = 12,1 mg/kg					
RÖK 3 P = 14,5 mg/kg; Ca + Mg = 15,0 mg/kg					
RÖK 4 P = 23,0 mg/kg; Ca + Mg = 20,5 mg/kg					

In der Draufsicht sind bei allen Kolben deutliche Unterschiede in der Ablagerungsbildung zwischen RÖK 1 und RÖK 2 bis RÖK 4 sichtbar. Innerhalb der Phosphor-/Calcium-/Magnesium-haltigen Kraftstoffe ist jedoch nur noch eine schwache Abhängigkeit der Belagsbildung vom eingesetzten Kraftstoff zu erkennen. Auffällig ist, dass die Bildung von aschehaltigen Belägen mit einer sehr starken Tendenz in Richtung des Einlassventils erfolgt. Weiterhin lässt sich die Richtung der fünf Einspritzstrahlen erkennen (siehe auch Befundung der Brennraumdecke).

Im Unterschied zur Ablagerungsbildung auf der Kolbenoberfläche ist im Feuerstegbereich kein Unterschied zwischen den einzelnen Kraftstoffen zu erkennen. Die Bilder zeigen deutlich, dass Ablagerungen im Feuerstegbereich entweder an der Laufbuchse oder am Kolben anhaften können. Eine klare Gesetzmäßigkeit existiert dafür aber nicht. Grundsätzlich bilden sich diese Ablagerungen jedoch eher an der kühleren Laufbuchse (Kondensationseffekte). Bei BHKW 1 scheint es, dass auf Seite 3 tendenziell weniger Ablagerungen am Kolben anhaften als an den anderen Seiten. Dies ist bei BHKW 2 weniger stark ausgeprägt.

Die Kolbenringe aller Kolben waren auch nach den Prüfläufen freigängig, das Tragbild der Ringe unauffällig.

6.2 Einfluss des Betriebsprofils

Eine erste Auswertung des Einflusses des Betriebsprofils auf die Ablagerungsbildung erfolgte anhand der Prüfläufe zum Kraftstoffeinfluss (Kapitel 6.1). Um den dort vermuteten Einfluss näher zu untersuchen, wurden weitere Versuchsreihen speziell zum Einfluss des Betriebsverhaltens durchgeführt. Mit Ausnahme eines Referenzprüflaufs mit RÖK 1 kam dabei ausschließlich RÖK 5 zum Einsatz, um eine ausreichende Ablagerungsbildung innerhalb von 100 Betriebsstunden zu gewährleisten. Die Prüfläufe wurden ohne Partikelfilter durchgeführt, so dass sämtliche Effekte direkt dem Brennraum zugeschrieben werden können. Die zyklischen DPF-Regenerationsphasen (alle drei Betriebsstunden eine 12-minütige Phase mit um 10 % erhöhter Motorleistung) wurde jedoch beibehalten, um neben dem Einfluss von Start-Stop-Ereignissen auch die Auswirkungen von Leistungssprüngen während des Betriebs beurteilen zu können. Tabelle 29 zeigt die durchgeführten Versuchsreihen im Überblick.

Tabelle 29: Versuchsreihen zum Einfluss des Betriebsprofils

Prüflauf	Kraftstoff	Betriebsprofil
B1	RÖK 1	Dauerbetrieb
B2	RÖK 5	Dauerbetrieb
B3	RÖK 5	Taktbetrieb 3/1 (3 h an; 1 h aus)
B4	RÖK 5	Taktbetrieb 3/1 (3 h an; 1 h aus), Wiederholung
B5	RÖK 5	Taktbetrieb 1/1 (1 h an; 1 h aus)
B6	RÖK 5	Taktbetrieb 1/1 (1 h an; 1 h aus), Wiederholung

In Abbildung 71 und Abbildung 72 sind der Verlauf der spezifischen Abgastemperatur über der Laufzeit sowie die aufsummierten Phasen positiver und negativer Änderung der spezifischen Abgastemperatur dargestellt. Die Unterschiede im Absolutniveau der spezifischen Abgastemperatur zwischen den einzelnen Prüfläufen resultieren wiederum aus Bauteil- und Montagetoleranzen.

Wie zu erwarten, besteht ein vom Betriebsprofil unabhängiger deutlicher Unterschied zwischen dem Referenzprüflauf mit RÖK 1 und den mit RÖK 5 durchgeführten Prüfläufen. Weiterhin sind bei allen Prüfläufen die Zeitanteile mit Ablagerungsaufbau deutlich größer als die mit Ablagerungsabbau, wobei der Unterschied im Dauerbetrieb unabhängig vom eingesetzten Kraftstoff gegenüber den Prüfläufen mit Taktbetrieb geringer ausfällt. Dies kann als Indiz für einen unruhigeren Motorlauf im Taktbetrieb gewertet werden.

Die Betrachtung der aufsummierten Änderungen der spezifischen Abgastemperatur in positiver und negativer Richtung zeigt ebenfalls, dass die Messdaten von Prüfläufen mit stärkerem Ablagerungsaufbau (größere Änderung in positiver Richtung) generell auch Anzeichen auf stärkeren Ablagerungsabbau (größere Änderung in negativer Richtung) aufweisen.

Ein Vergleich der Prüfläufe mit gleichen Versuchsbedingungen zeigt eine gute Übereinstimmung der beiden Versuchsreihen Taktbetrieb 1/1, während die beiden Versuchsreihen Taktbetrieb 3/1 größere Unterschiede aufweisen, welche jedoch hauptsächlich aus der Anfangsphase der Versuchsreihen resultieren.

Eindeutige Unterschiede in den Gradienten der Verläufe positiver und negativer Änderungen sind zwischen diesen fünf Prüfläufen nicht erkennbar.

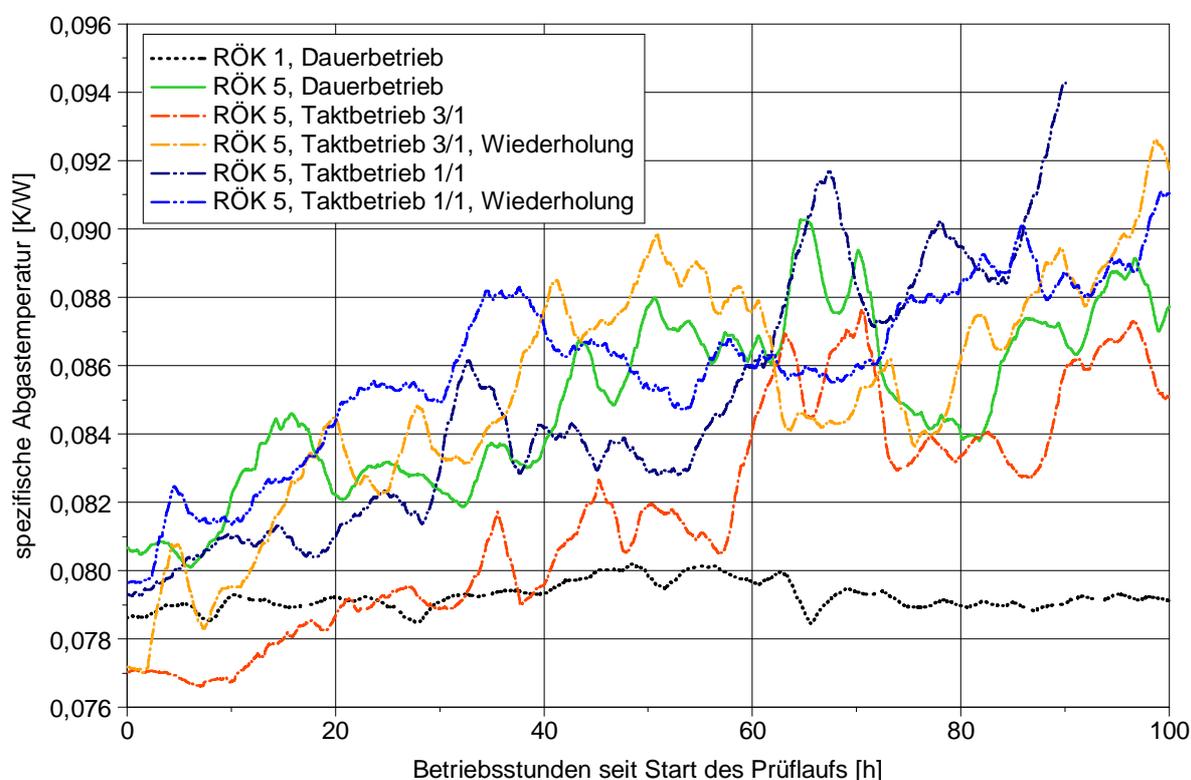


Abbildung 71: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Betriebsprofilen

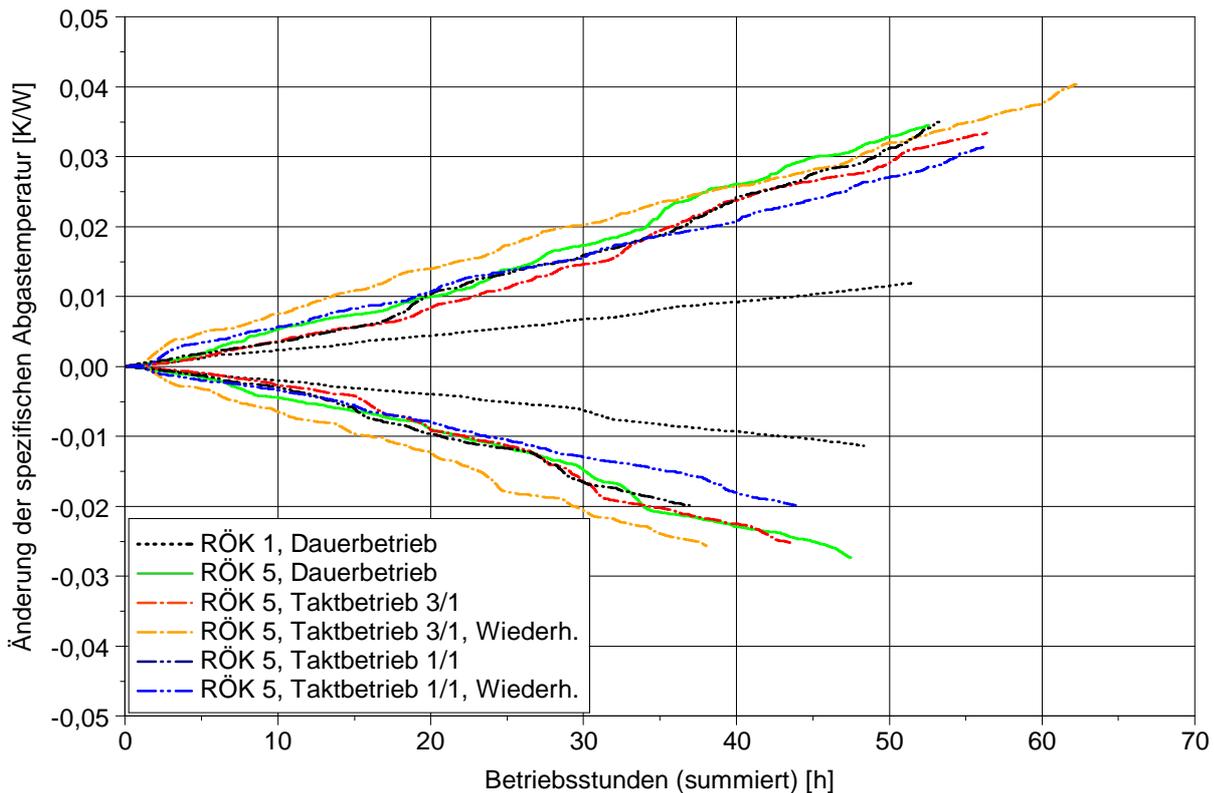


Abbildung 72: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Betriebsprofilen

Die abschnittsweise Betrachtung der einzelnen Prüfläufe zeigt, dass Start-Stopp-Ereignisse bzw. DPF-Regenerationsphasen nur in wenigen Fällen zu einer direkten Änderung der spezifischen Abgastemperatur führen. Hingegen sind insbesondere in den Prüfläufen mit Dauerbetrieb und Taktbetrieb 3/1 auch Änderungen der spezifischen Abgastemperatur zu beobachten, die nicht in zeitlichem Zusammenhang mit einem der genannten Ereignisse stehen.

Bei dem in Abbildung 73 dargestellten, für den Ablagerungsabbau relevanten, mittleren Gradienten der positiven Summenabweichung der spezifischen Abgastemperatur sind keine Unterschiede zwischen den einzelnen Prüfläufen zu erkennen. Der in Abbildung 74 dargestellte Ablagerungsabbau scheint beim Taktbetrieb 3/1 tendenziell stärker ausgeprägt zu sein als beim Taktbetrieb 1/1 oder beim Dauerbetrieb.

Die ebenfalls zur Beurteilung von Ablagerungsauf- und -abbau herangezogene gewichtete Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur (Abbildung 75) deutet dagegen auf einen leichten Vorteil des Dauerbetriebs hin.

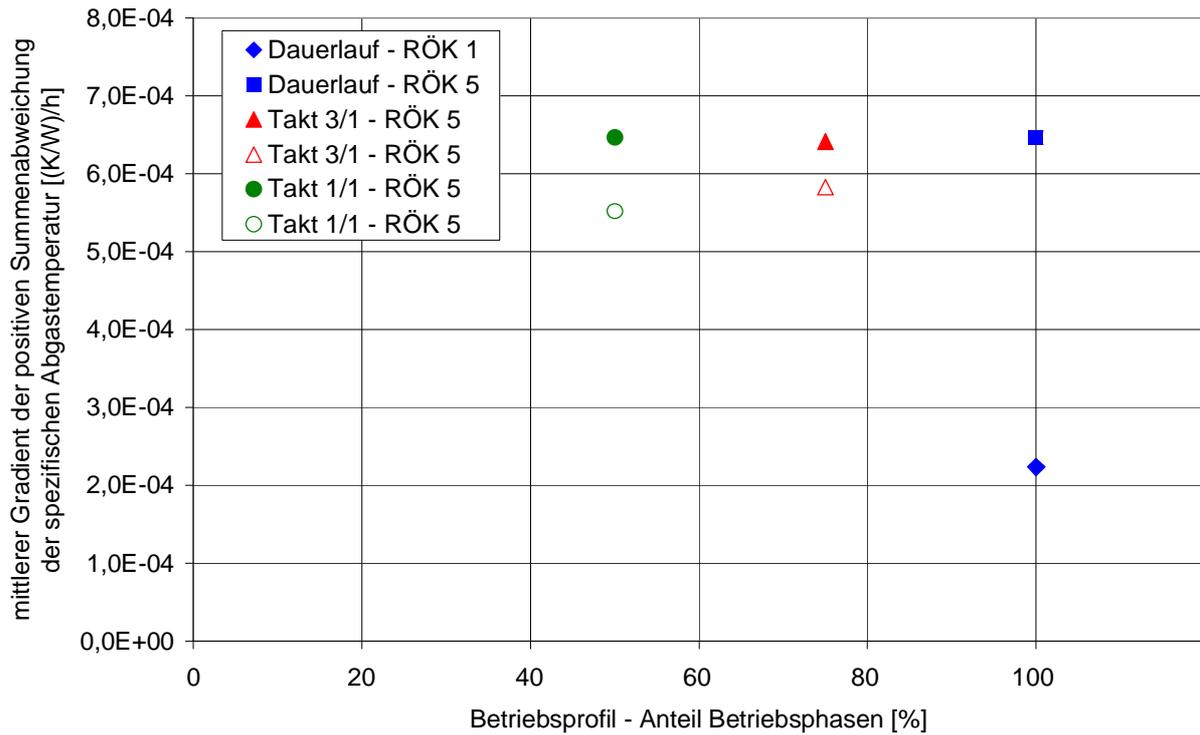


Abbildung 73: Zusammenhang zwischen Ablagerungsaufbau und Betriebsprofil

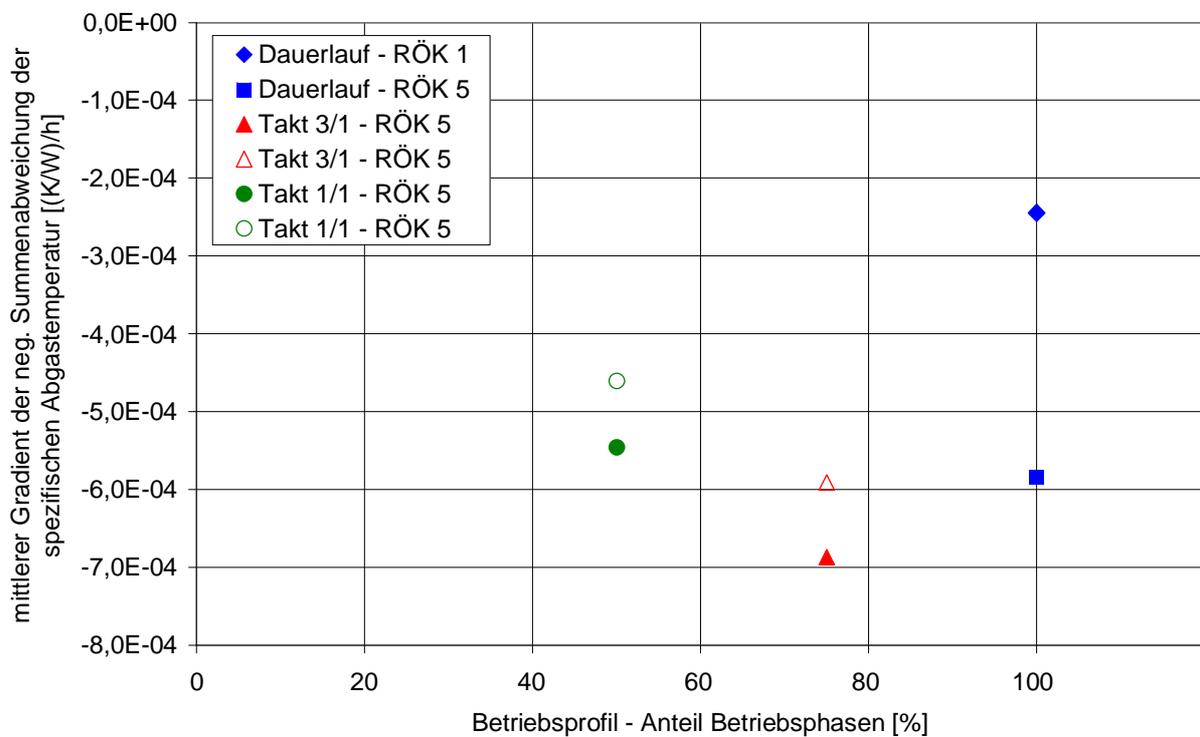


Abbildung 74: Zusammenhang zwischen Ablagerungsabbau und Betriebsprofil

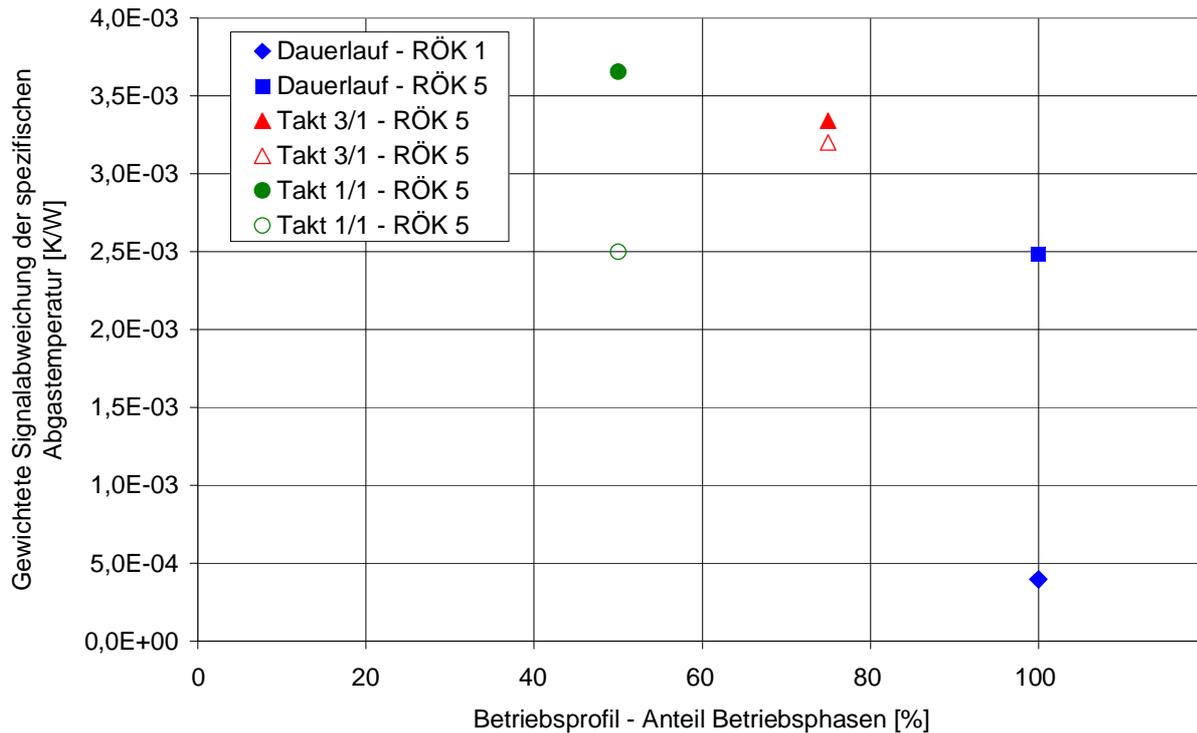


Abbildung 75: Zusammenhang zwischen der gewichteten Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur und Betriebsprofil

6.3 Einfluss des Temperaturniveaus

Der Einfluss des Temperaturniveaus von Oberflächen auf die Ablagerungsbildung wird in der Literatur uneinheitlich bewertet. Aus diesem Grund wurde in eigenen Untersuchungen untersucht, mit welchen Methoden die Temperatur der Einspritzdüsen Spitze im Betrieb beeinflusst werden kann und welche Auswirkungen sich daraus auf die Ablagerungsbildung ergeben.

6.3.1 Voruntersuchungen zur Abschätzung des Temperaturpotenzials

Die Voruntersuchungen dienen zur Abschätzung der Auswirkungen von verschiedenen Maßnahmen zur Beeinflussung der Temperatur an der Einspritzdüsen Spitze.

Sofern nicht abweichend beschrieben, wurden alle in diesem Kapitel dargestellten Messwerte im Nennbetriebspunkt des BHKW aufgenommen ($P_{el} = 5,0 \text{ kW}$, $n_{Motor} = 2450 \text{ min}^{-1}$).

Die Temperaturen an der Einspritzdüse schwankten während der Messzeiten um maximal $\pm 2 \text{ K}$ (Düsen Spitze) bzw. $\pm 1 \text{ K}$ (Düsenkörper), für die Auswertung wurde jeweils der Mittelwert der Messungen berücksichtigt. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, unterscheiden sich die an der Düsen Spitze gemessenen Temperaturen zwischen den beiden DHK-Typen um ca. 8 K. Für die hier durchgeführten vergleichenden Untersuchungen ist dies jedoch ohne Bedeutung.

Die Untersuchung des **Einflusses der Generatorleistung** auf die Einspritzdüsentemperatur ergab, dass eine Reduzierung der Leistung um ca. 10 % zu einer Verringerung der Temperatur der Einspritzdüsen Spitze von ca. 7 K (entspricht ca. 3 %) führt.

Zur Untersuchung des **Einflusses des Überstands der Einspritzdüsen Spitze** in den Brennraum wurden Versuche mit reduziertem Brennraumüberstand durchgeführt. Dazu wurde die komplette Düsenhalterkombination mit unterschiedlich dicken Dichtringen im Zylinderkopf montiert. Durch eine Verringerung der Eindringtiefe der Einspritzdüsen Spitze in den Brennraum um 1 mm kann die Temperatur an der Einspritzdüsen Spitze um 22 K abgesenkt werden.

Zur Untersuchung des **Einflusses des Förderbeginns** auf die Temperatur der Einspritzdüsen Spitze wurde dieser in 6 Schritten von 8,8 vor OT bis 13,9 vor OT variiert. Mit zunehmender Spätverschiebung verringert sich die Temperatur an der Düsen Spitze um bis zu 20 K. Der Zusammenhang zwischen Förderbeginn und Temperatur ist dabei annähernd linear.

Durch eine verringerte Eindringtiefe der Einspritzdüsen Spitze ändert sich die Lage der Einspritzstrahlen zur Kolbenmulde, wodurch der Ablauf der Verbrennung beeinflusst wird. Dies ist grundsätzlich durch Anpassung des Einspritzzeitpunktes (Verschiebung in Richtung „früh“) kompensierbar. Wie die Ergebnisse zum Einfluss des Förderbeginns zeigen, kann jedoch diese erforderliche Frühverstellung des Einspritzzeitpunktes den Effekt der Temperaturabsenkung zumindest teilweise wieder kompensieren. Dennoch kann die Variation der Düsenposition in Kombination mit einem entsprechend angepassten Einspritzzeitpunkt zu einer Absenkung der Temperatur an der Einspritzdüsen Spitze führen. Dazu sind allerdings umfangreiche Abstimmarbeiten erforderlich, welche über das Ziel dieser Arbeit hinaus gehen.

Einfluss der Wärmeabfuhr auf die Einspritzdüsentemperatur

Durch konstruktive Änderungen der Wärmeabfuhr kann die Temperatur an der Einspritzdüsen Spitze ohne Beeinflussung der für den Einspritz- und Verbrennungsvorgang relevanten Einstellwerte und Geometrieparameter variiert werden. Eine Wärmeleithülse aus Kupfer verbessert die Wärmeabfuhr von der Spitze der Einspritzdüse über den Düsenchaft zum Düsenhalter und zur Dichtfläche mit dem Zylinderkopf. Dadurch kann ein größerer Wärmestrom von der brennraumseitigen Seite der Einspritzdüse in kühlere Regionen abfließen. Abbildung 76 zeigt die typische Form einer solchen Wärmeleithülse.



Abbildung 76: Typische Ausführung einer Wärmeleithülse aus Kupfer

Insbesondere bei einer geneigten Einbaulage der Einspritzdüse zur Zylinderachse ist die Länge einer Wärmeleithülse oft nur als Kompromiss auszulegen. Eine lange Wärmeleithülse, welche bis kurz vor die Düsenkuppe reicht, bietet gegenüber einer kürzeren Ausführung Vorteile bei der Wärmeabfuhr aus der Düse. Aufgrund der schrägen Einbaulage des Düsenhalters befindet sich dabei jedoch ein Teil der Wärmeleithülse im Brennraum und kann dort direkt von der Verbrennung erwärmt werden. Dies führt unter Umständen sogar zu höheren Temperaturen an der Einspritzdüsen Spitze. Abhilfe schafft eine Wärmeleithülse, welche auch bei schräger Einbaulage

des Düsenhalters bündig mit den Brennraum abschließt. Diese Variante ist fertigungs- und montagetechnisch jedoch wesentlich aufwändiger zu realisieren, weshalb neben dieser theoretisch optimalen Gestaltung zusätzlich die einfacher umzusetzenden Varianten „kurz“ (kein Überstand in den Brennraum) und „lang“ (am gesamten Umfang Überstand in den Brennraum) berücksichtigt wurden.

Untersucht wurden folgende Varianten:

- thermische Isolation der Einspritzdüse zum Zylinderkopf durch Einsatz einer Kunststoff-Dichtscheibe statt der normalen Kupferdichtung („-1“)
- Serienzustand („0“) mit Kupferdichtring
- Aufgepresste Wärmeleithülse „kurz“ („1“)
- Aufgepresste Wärmeleithülse „lang“ („2“)
- Aufgepresste Wärmeleithülse „bündig schräg“ („3“)

Abbildung 77 zeigt die Temperaturen an Düsen Spitze und im Düsenkörper für die fünf untersuchten Varianten.

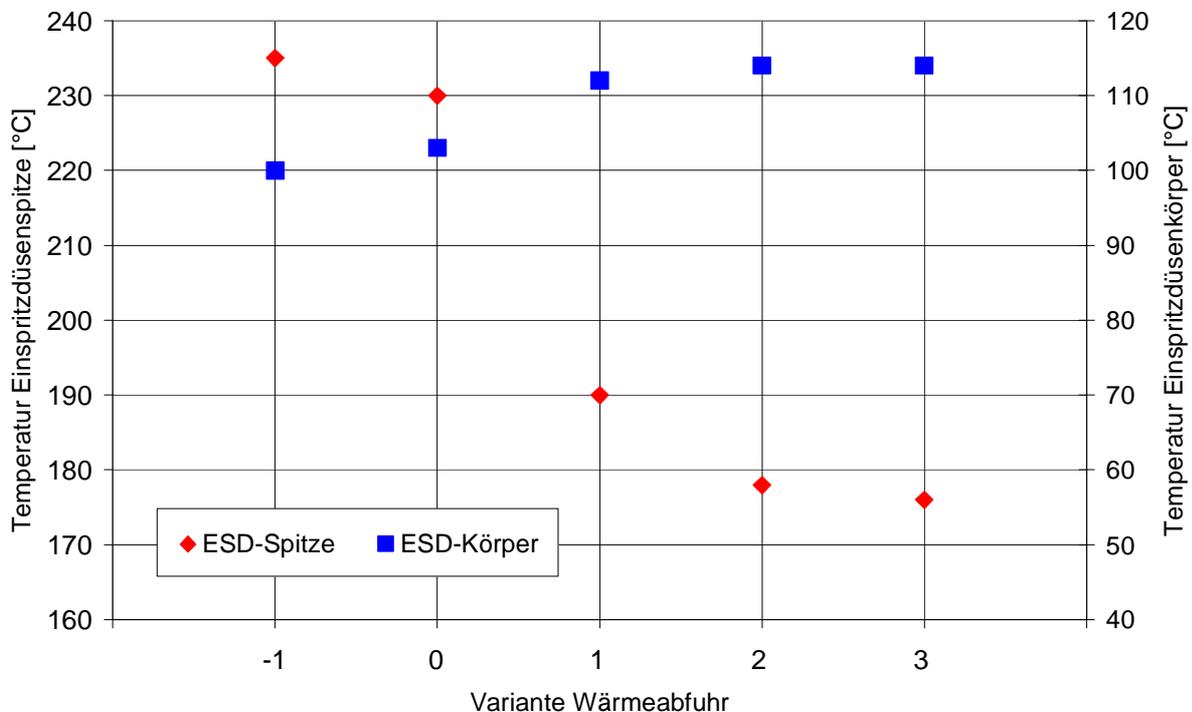


Abbildung 77: Einfluss der Wärmeabfuhr auf die Temperaturen an der Einspritzdüsen Spitze und im Einspritzdüsenkörper

Die Ergebnisse zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen der Temperatur an der Düsen Spitze und der Temperatur im Düsenkörper. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Einsatz einer Wärmeleithülse (Varianten 1 bis 3) zu einer signifikanten Absenkung der Temperatur an der Düsen Spitze führt, durch die verbesserte Wärmeabfuhr aber gleichzeitig die Temperatur des Düsenkörpers ansteigt.

Ein partieller Überstand der Wärmeleithülse in den Brennraum hat keinen nennenswerten negativen Einfluss auf die Temperatur von Düsen Spitze und Düsenkörper, sondern führt gegenüber einer „zu kurzen“ Wärmeleithülse zu einer deutlichen Absenkung der Temperatur an der Düsen Spitze.

Ein Einfluss der Wärmeleithülse auf die Verbrennung konnte nicht festgestellt werden.

Im Falle der thermischen Isolation der Einspritzdüse zum Zylinderkopf (Variante „-1“) ist der Effekt der verminderten Wärmeabfuhr zu erkennen. Die Temperatur an der Einspritzdüsen- spitze ist geringfügig höher als im Serienzustand. Weiterhin bleibt der Düsenkörper selbst kühler.

6.3.2 Einfluss der Einspritzdüsentemperatur auf die Ablagerungsbildung

Basierend auf den Voruntersuchungen zum Einfluss verschiedener konstruktiver Ausführungen und Betriebsparameter auf die Einspritzdüsentemperatur wurden drei Dauerlaufprüfläufe über 100 Betriebsstunden durchgeführt, in denen die Auswirkungen verschiedener Düsen- spitzen-temperaturen aufgrund unterschiedlicher Wärmeabfuhr auf das Ablagerungsbildungsverhalten untersucht wurden. Zum Einsatz kamen die in Kapitel 6.3.1 vorgestellten Varianten „-1“, „0“ und „2“. Als Kraftstoff wurde RÖK 5 aufgrund seines sehr hohen Gehalts an Phosphor, Calcium und Magnesium gewählt, um eine starke Belagsbildung innerhalb kurzer Zeit zu ermöglichen. Der Partikelfilter wurde für diese Versuchsreihe durch einen offenen Träger ersetzt, so dass die Temperaturerhöhung einzig aus der Ablagerungsbildung im Brennraum resultiert.

Nach 100 Betriebsstunden war bei allen drei untersuchten Varianten die spezifische Abgas- temperatur des Motors deutlich angestiegen (siehe Abbildung 78).

Ähnlich zu den in Kapitel 6.1 vorgestellten Ergebnissen der Langzeit-Prüfläufe zeigt sich auch hier eine große Schwankung der spezifischen Abgastemperatur. Auffällig ist weiterhin, dass sowohl bei der Serienausführung als auch bei der thermisch getrennten Ausführung der Einspritzdüse die Abgastemperatur während der Prüfläufe mehrmals sehr stark (um bis zu $6 \cdot 10^{-3}$ K/W; entspricht ca. 7 %) abgefallen ist. Bei der Ausführung mit Wärmeleithülse waren diese Abfälle ebenfalls vorhanden, jedoch in weitaus geringerer Ausprägung (max. ca. $3 \cdot 10^{-3}$ K/W). Diese Ereignisse haben großen Einfluss auf die am Ende des Prüflaufs resultierende Änderung der spezifischen Abgastemperatur.

Die getrennte Betrachtung von Phasen positiver und negativer Änderungen der spezifischen Abgastemperatur ist in Abbildung 79 dargestellt. Hier sind nur geringfügige Unterschiede im Ablagerungsabbau zu erkennen. Der Ablagerungsaufbau scheint mit isolierter Einspritzdüse am stärksten, die Verläufe mit Serienausführung und mit Wärmeleithülse sind praktisch identisch.

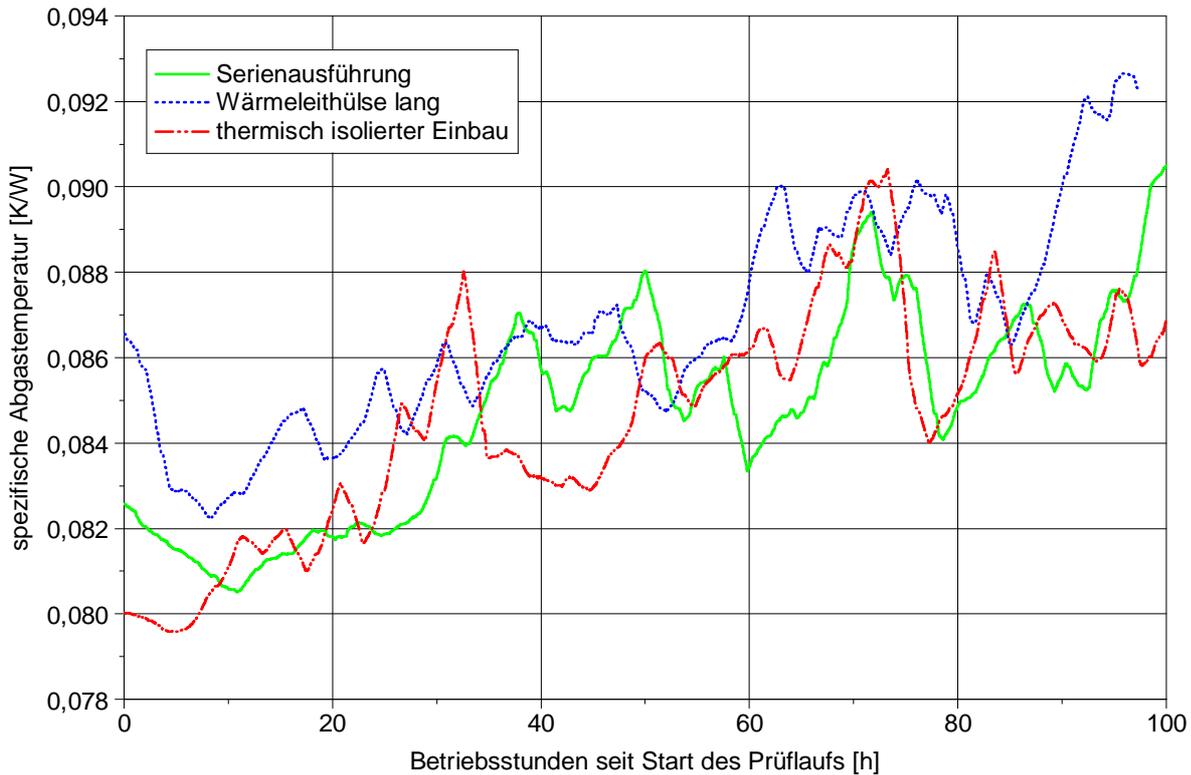


Abbildung 78: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Temperaturen der Einspritzdüsen Spitze

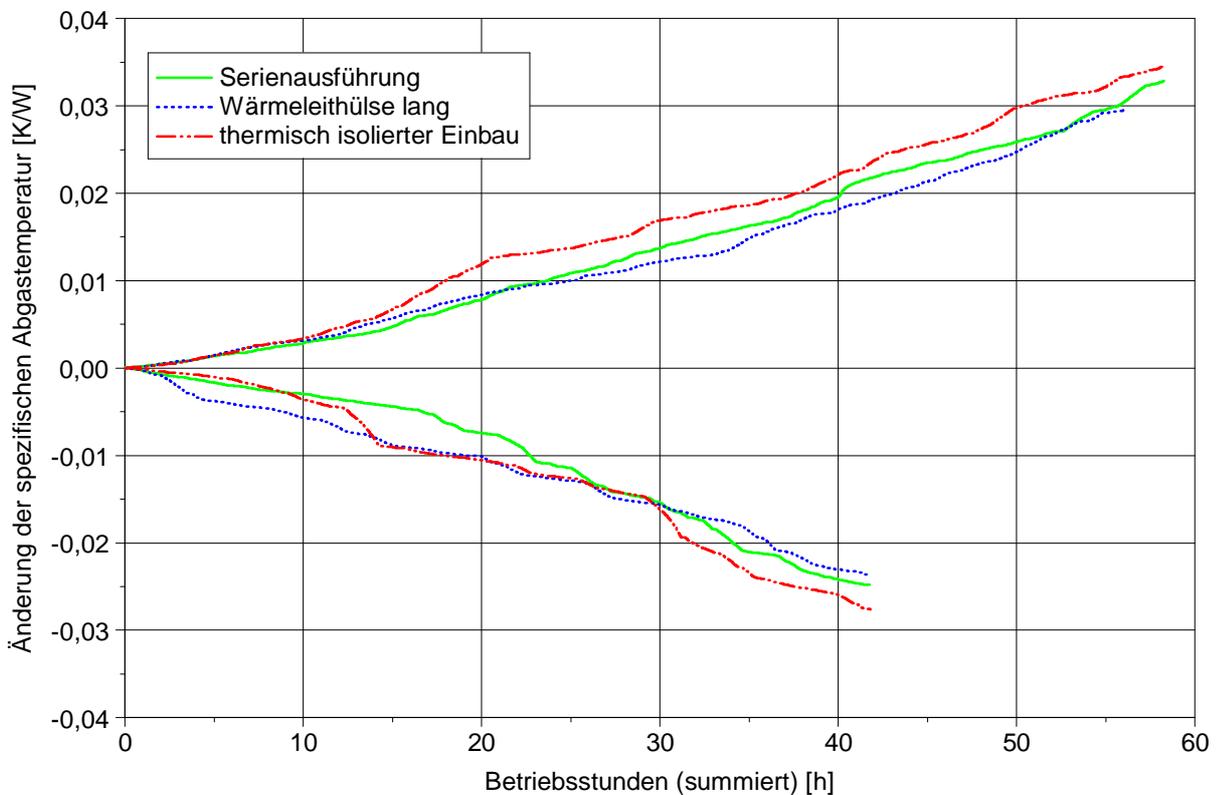


Abbildung 79: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Temperaturen der Einspritzdüsen Spitze

Die Auswertung der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur sowie der gewichteten Signalabweichung des Verlaufs dieser Messgröße sind in Abbildung 80, Abbildung 81 und Abbildung 82 dargestellt.

Alle drei Auswertungen deuten auf eine erhöhte Ablagerungsbildung bei heißer Einspritzdüsen-
spitze hin, obwohl der Unterschied zur Serienausführung nur ca. 5 K beträgt. Die Temperatur
der Düsen-
spitze der mit einer Wärmeleithülse versehenen Einspritzdüse liegt ca. 32 K unterhalb
der Serienausführung, dennoch ist eine eindeutige Auswirkung auf den Ablagerungsauf- und -
abbau nur in der Auswertung der mittleren Gradienten von steigenden und fallenden Phasen
des Verlaufs der spezifischen Abgastemperatur über die Dauer des Prüflaufs zu erkennen.
Die Betrachtung der gewichteten Signalabweichung dieser Messgröße liefert keine eindeutige
Aussage.

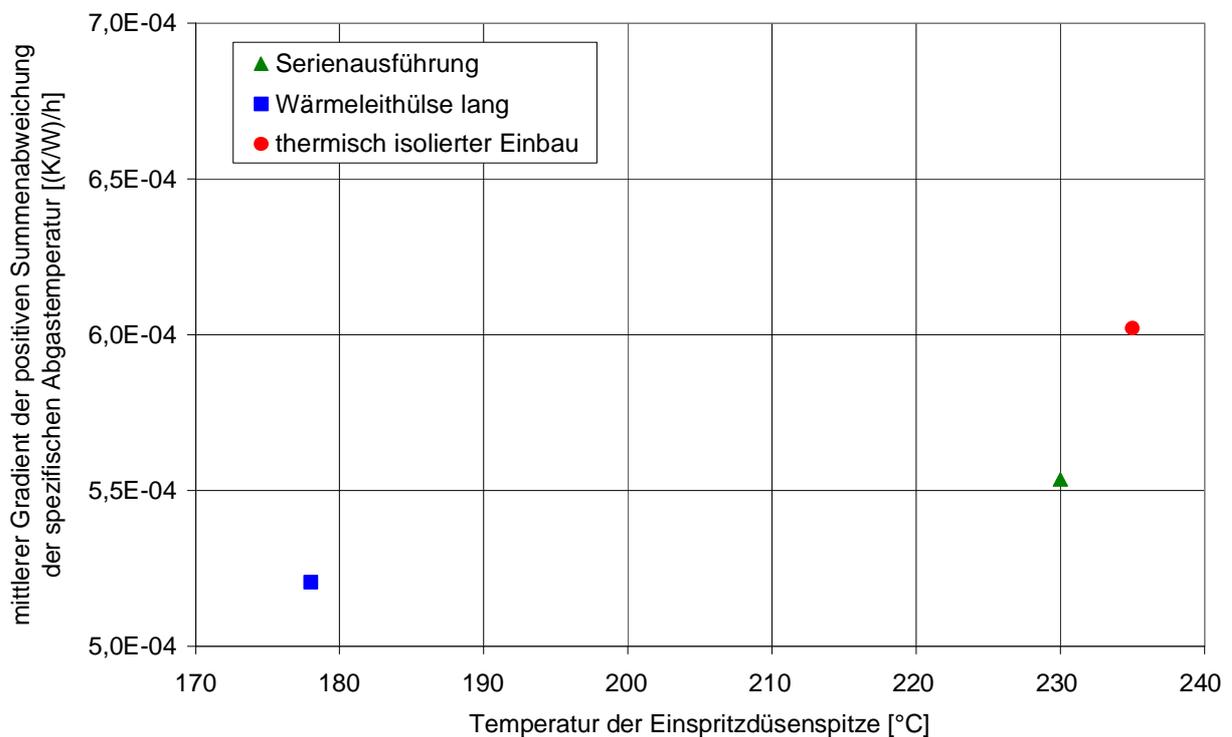


Abbildung 80: Zusammenhang zwischen Ablagerungsaufbau und Temperatur der Einspritzdüsen-
spitze

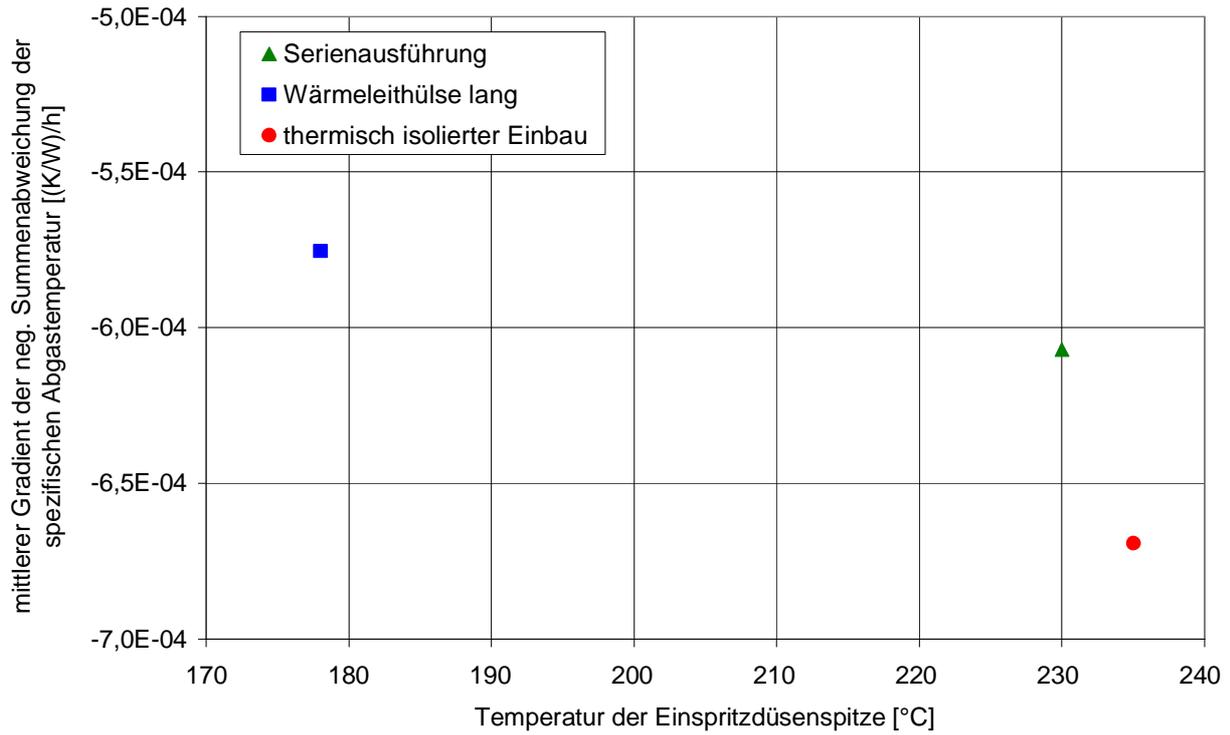


Abbildung 81: Zusammenhang zwischen Ablagerungsabbau und Temperatur der Einspritzdüsen Spitze

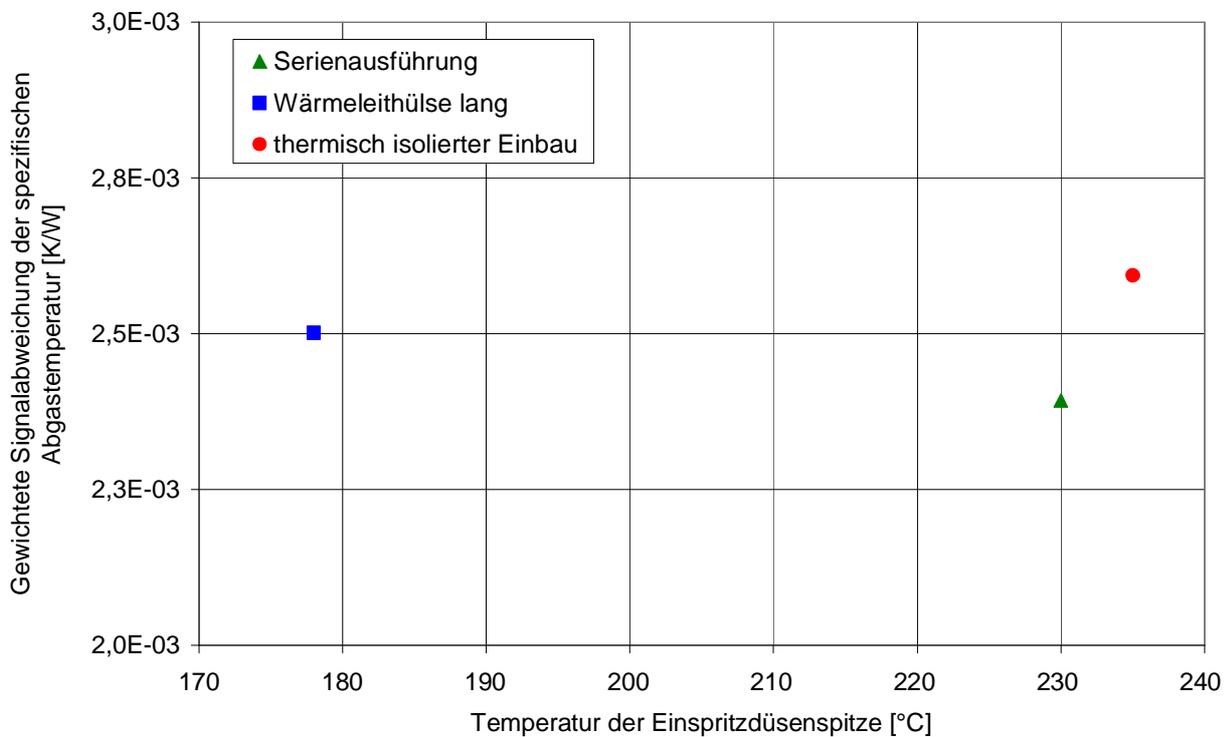


Abbildung 82: Zusammenhang zwischen der gewichteten Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur und Temperatur der Einspritzdüsen Spitze

7 Ergebnisse und Diskussion der Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Einfluss von Kraftstoff, Betriebsprofil und Bauteiltemperaturniveau auf die Ablagerungsbildung in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem untersucht. Die motorischen Auswirkungen wurden hauptsächlich anhand der spezifischen Abgastemperatur bewertet, zusätzlich erfolgte eine direkte Beurteilung der Ablagerungen durch Bauteilbefundungen nach einzelnen Prüfläufen.

Diese Ergebnisse bilden die Basis für die Entwicklung von Methoden zur Online-Erkennung von motorschädlicher Ablagerungsbildung, mit der der dynamische Verlauf von Ablagerungsauf- und -abbau im laufenden Betrieb erfasst werden kann. Die Erfassung im laufenden Betrieb ist insbesondere zur Beurteilung von Sättigungs- und Reinigungseffekten von großer Bedeutung.

Abbildung 83 zeigt die vorgestellten Methoden dem jeweiligen Differenzierungsgrad der Erkennung zugeordnet. Die einzelnen Methoden werden in den nachfolgenden Kapiteln im Detail vorgestellt.

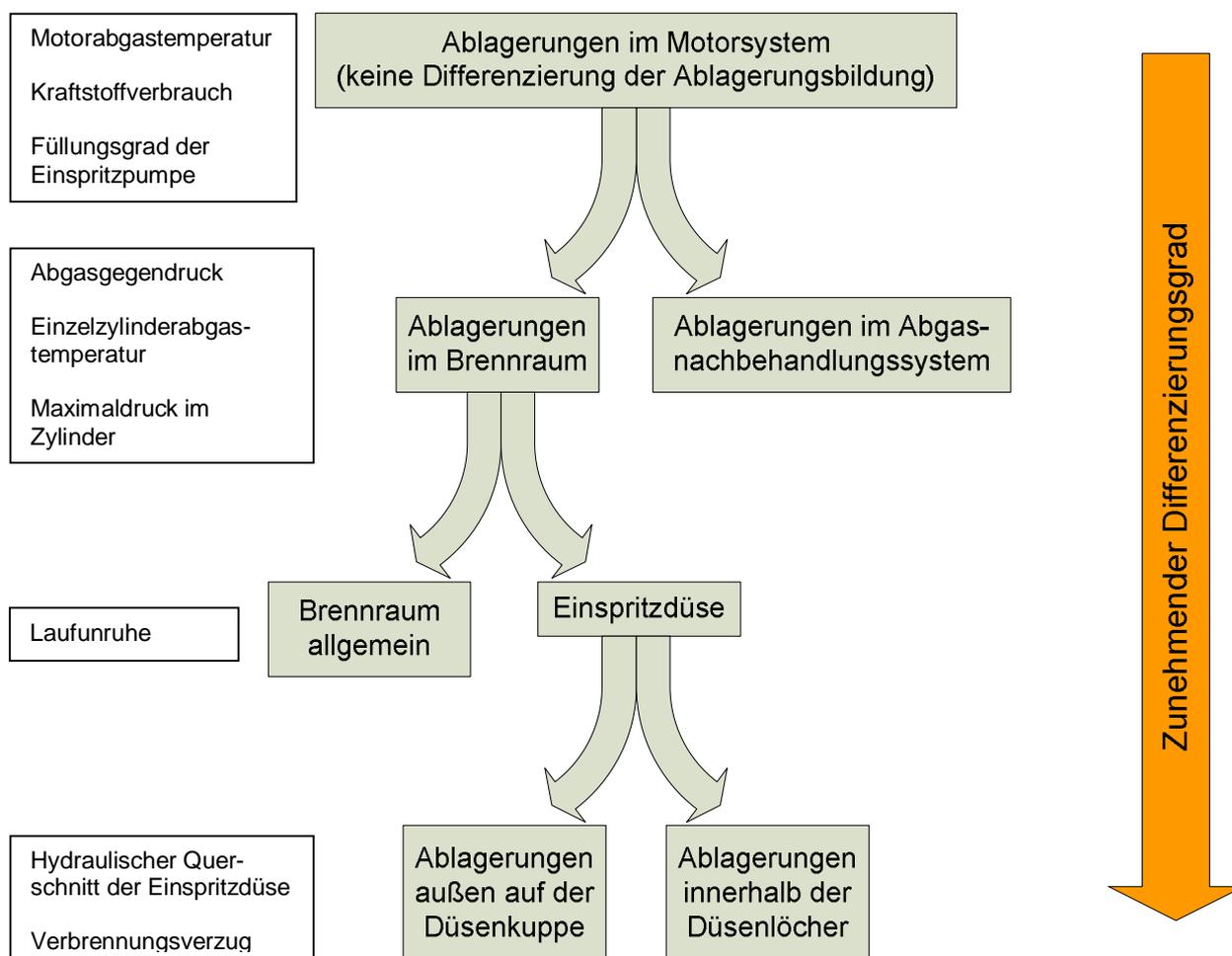


Abbildung 83: Messgrößen für unterschiedliche Differenzierungsgrade der Ablagerungsbildung

7.1 Ebene 1: Ablagerungen im Motorsystem

Die Methoden zur Erkennung von Ablagerungsbildung der Ebene 1 basieren auf der Annahme, dass jegliche Art der Ablagerungsbildung zu einer Verstimmung der Verbrennung und damit zu einer Verschlechterung des indizierten Wirkungsgrades führt. Es erfolgt keine Differenzierung innerhalb des Motorsystems.

7.1.1 Motorabgastemperatur

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, eignet sich die Abgastemperatur zur generellen Erkennung von Änderungen der Ablagerungssituation als einfach zu messende Größe. Da die Abgastemperatur jedoch in direkter Abhängigkeit zur Motorleistung steht, muss dieser Zusammenhang in dem Verfahren berücksichtigt werden. Dies kann über rechnerische Korrektur des momentanen Betriebspunktes (Kapitel 5.4.1), Berechnung der spezifischen Abgastemperatur (Kapitel 5.4.2) oder Vergleich zwischen realer und idealer Abgastemperatur (Kapitel 5.4.3) erfolgen.

Die spezifische Abgastemperatur diene als Grundlage bei der Auswertung der Einflüsse von Kraftstoff, Betriebsprofil und konstruktiver Ausführung (Kapitel 6.1, 6.2 und 6.3). Ihr Verhalten wurde bereits ausführlich in den Versuchsreihen der Grundlagenuntersuchungen zur Ablagerungsbildung behandelt, daher wird auf weitere Ausführungen an dieser Stelle verzichtet.

7.1.2 Spezifischer Kraftstoffverbrauch

Unter der Annahme, dass Ablagerungen in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem den Wirkungsgrad der Verbrennung und des Ladungswechsels beeinflussen, lassen sich Ablagerungen anhand des spezifischen Kraftstoffverbrauchs erkennen.

Abbildung 84 zeigt den Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs während eines Dauerlaufs über 250 Betriebsstunden mit stark ablagerungsbildendem Kraftstoff (RÖK 4) im Vergleich zu dem Betrieb mit nur sehr schwach ablagerungsbildendem Kraftstoff (RÖK 1). Zu beachten ist hierbei, dass es sich bei den dargestellten Punkten um nicht kontinuierlich aufgenommene Messdaten handelt, deren Aussagekraft – wie in Kapitel 6.1.1 gezeigt – nur eingeschränkt ist.

Die Belagsbildung in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem führt zu einem deutlichen Anstieg des spezifischen Kraftstoffverbrauchs. Die Brennraumablagerungen beeinflussen die Verbrennung negativ, die Beladung des Partikelfilters bedingt eine höhere Ladungswechselarbeit. Beide Effekte führen zu einem Anstieg des spezifischen Kraftstoffverbrauchs.

Der bei der Messreihe RÖK 4 zu beobachtende wiederkehrende Abfall und Anstieg des spezifischen Kraftstoffverbrauchs wird eventuell durch Ablagerungsauf- und Abbau im Brennraum verursacht. Eine eindeutige Klärung ist allein anhand des spezifischen Kraftstoffverbrauchs jedoch nicht möglich.

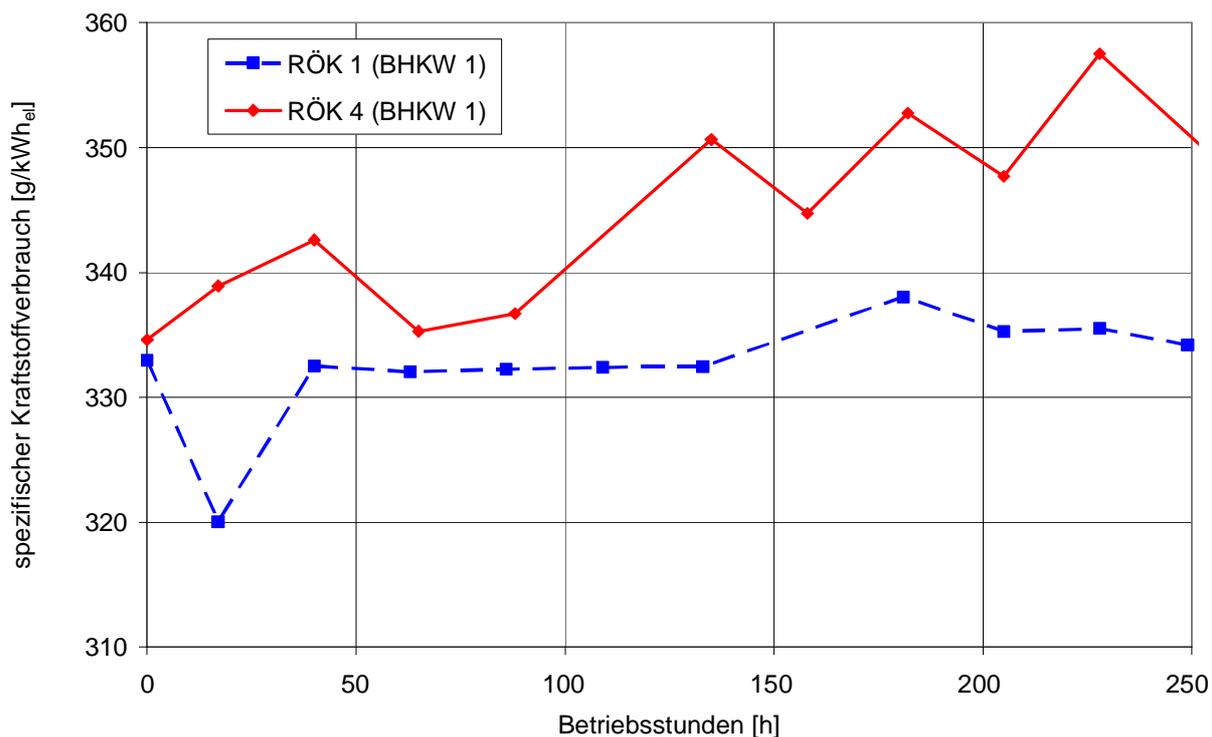


Abbildung 84: Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bei Verwendung zweier unterschiedlicher Kraftstoffe

7.1.3 Füllungsgrad der Einspritzpumpe

Mittels einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und an den BHKW applizierten Messtechnik kann der Füllungsgrad der Einspritzpumpe anhand der Regelstangenposition kontinuierlich aufgezeichnet werden. Bei konstanten Umgebungsbedingungen ist die Regelstangenposition proportional zur eingespritzten Kraftstoffmenge pro Arbeitsspiel.

Im momentengeregelten Stationärbetrieb stellt diese Messgröße eine einfach zu realisierende Alternative zur direkten Messung des Kraftstoffverbrauchs dar. Es muss jedoch dafür Sorge getragen werden, dass insbesondere Kraftstofftemperatur (Viskosität) und Druck in der Einspritzpumpe konstant bleiben, da die direkt von diesen Größen abhängige Leckölmenge in der Einspritzpumpe den Zusammenhang zwischen Regelstangenposition und eingespritzter Kraftstoffmenge beeinflusst.

7.2 Ebene 2: Differenzierung in Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem

Zur Differenzierung zwischen Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem wird angenommen, dass Ablagerungen im Brennraum nur die Verbrennung selbst, nicht aber den Ladungswechsel signifikant beeinflussen. Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem hingegen beeinflussen den Ladungswechsel, dadurch steigt die erforderliche Ladungswechselarbeit an, woraus sich wiederum Rückwirkungen auf die Verbrennung ergeben.

Das offensichtlichste Verfahren zur Erkennung von Ablagerungsbildung im Abgasnachbehandlungssystem in Serienanwendungen ist die Überwachung des Abgasgedrucks. Wie in Kapitel 2.2.3.2 gezeigt, ist dieses Verfahren alleine jedoch nur bedingt aussagekräftig und wird daher auch in Serienapplikationen nicht als einziges Kriterium zur Erkennung eines beladenen DPF herangezogen.

Änderungen in der Ladungswechselarbeit lassen sich bei entsprechender Instrumentierung des Motors mit Zylinderdruck- und Kurbelwinkelmesstechnik durch Auswertung der Ladungswechselschleife erkennen. Während Zylinderdrucksensoren nach und nach den Weg in Serienanwendungen finden, ist eine ausreichend hochauflösende Kurbelwinkelmesstechnik derzeit für diesen Einsatzfall noch nicht verfügbar.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein weiteres Verfahren untersucht, welches mit einfachen Mitteln den Ablauf der Verbrennung erfasst.

7.2.1 Einzelzylinderabgastemperatur

In Kapitel 7.1.1 wurde gezeigt, dass sich die Abgastemperatur grundsätzlich zur Erkennung von Ablagerungsbildung eignet. Allerdings ist beim Einzylindermotor keine Differenzierung nach dem Ort der Ablagerungsbildung (Brennraum oder Abgasnachbehandlungssystem) möglich. Beim Mehrzylindermotor hingegen ist über zylinderselektive Messung eine Differenzierung zwischen Brennraum (beeinflusst nur die dem jeweiligen Zylinder zugeordnete Abgastemperatur) und Abgasnachbehandlung (beeinflusst alle Zylinder gemeinsam) möglich.

7.2.2 Abgasgedruck

Zur Unterscheidung der Ablagerungsbildung im Brennraum von der im Abgasnachbehandlungssystem erscheint die Betrachtung des Abgasgedrucks im Auslasskanal als geeignete Maßnahme.

Das Verhalten des Abgasgedrucks bei Ablagerungsbildung im Abgasnachbehandlungssystem wurde bereits in den Untersuchungen zum Einfluss des Kraftstoffs (Kapitel 6.1.3.1) ausführlich untersucht. Sowohl diese eigenen Untersuchungen als auch Veröffentlichungen anderer Autoren [169] zeigen jedoch eine nicht ausreichende Korrelation der Beladungsmasse mit dem daraus resultierenden Gegendruck.

7.2.3 Maximaldruck im Zylinder

Als weitere Größe zur Differenzierung zwischen Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem ist der Maximaldruck im Zylinder geeignet. Dieser ist prinzipiell vom Ladungswechsel und dem Verbrennungsablauf abhängig. Wie nachfolgend gezeigt, ist in der Praxis jedoch der Einfluss des Verbrennungsablaufs wesentlich größer, so dass der Maximaldruck zur Erkennung von Verbrennungsabweichungen heran gezogen werden kann. Dabei ist die ausschließliche Betrachtung des Druckmaximums ausreichend, eine kurbelwinkelbezogene Zuordnung ist nicht erforderlich.

In Abbildung 85 sind die Auswirkungen unterschiedlicher Abgasgedrücke auf Kenngrößen des Verbrennungsablaufs bei konstanter Drehzahl und konstanten effektiven Mitteldruck dargestellt. Die aus einem höheren Abgasgedruck resultierende größere Ladungswechselarbeit ist in einer verlängerten Brenndauer zu erkennen, der Brennraumdruck am Ende der Kompressionsphase und der Maximaldruck im Zylinder bleiben hingegen unverändert. Die dargestellte Variation entspricht einem Ablagerungsaufbau ausschließlich im Abgasnachbehandlungssystem.

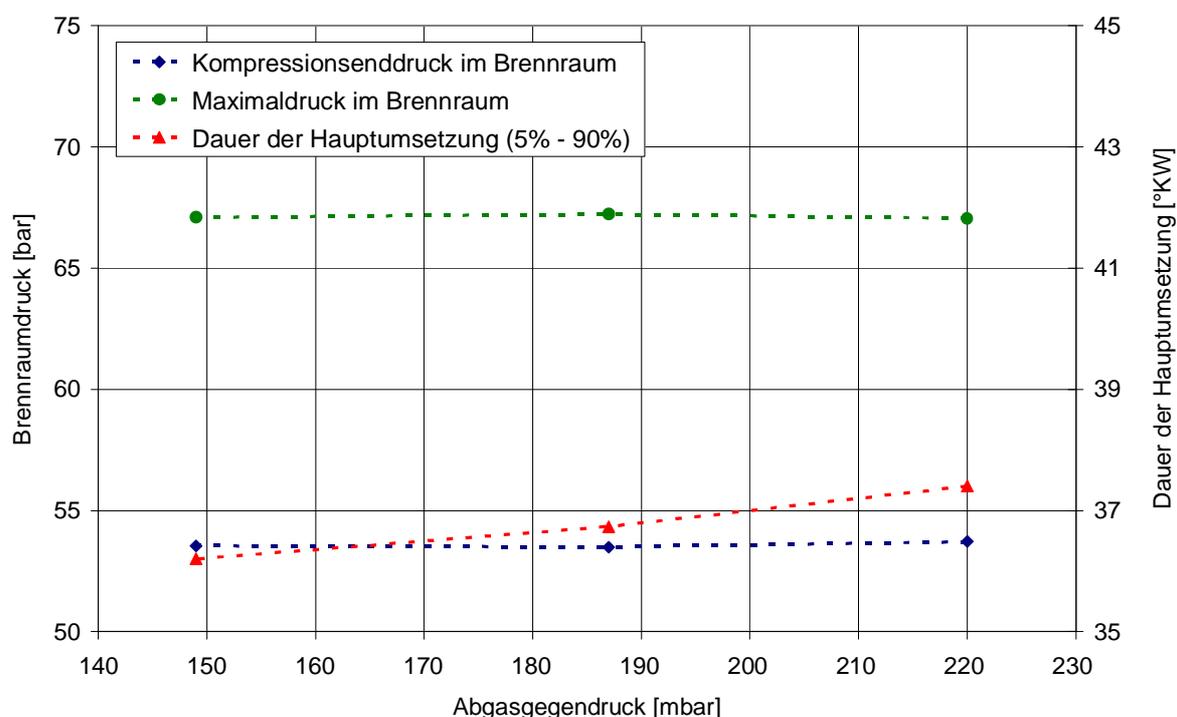


Abbildung 85: Einfluss des Abgasgedrucks auf Brennraumdruck und Verbrennungsablauf

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 86 die Auswirkungen von Ablagerungsbildung ausschließlich im Brennraum. Dargestellt ist die Veränderung der ausgewählten Größen über 90 Betriebsstunden eines Langzeitprüflaufs ohne Partikelfilter mit RÖK 5. Deutlich sind der am Ende des Langzeitprüflaufs angestiegene Kompressionsenddruck sowie der gesunkene Maximaldruck zu sehen. Ebenfalls klar zu erkennen ist die deutlich verlängerte Brenndauer (dargestellt als Dauer der Hauptumsetzung von 5 % bis 90 %).

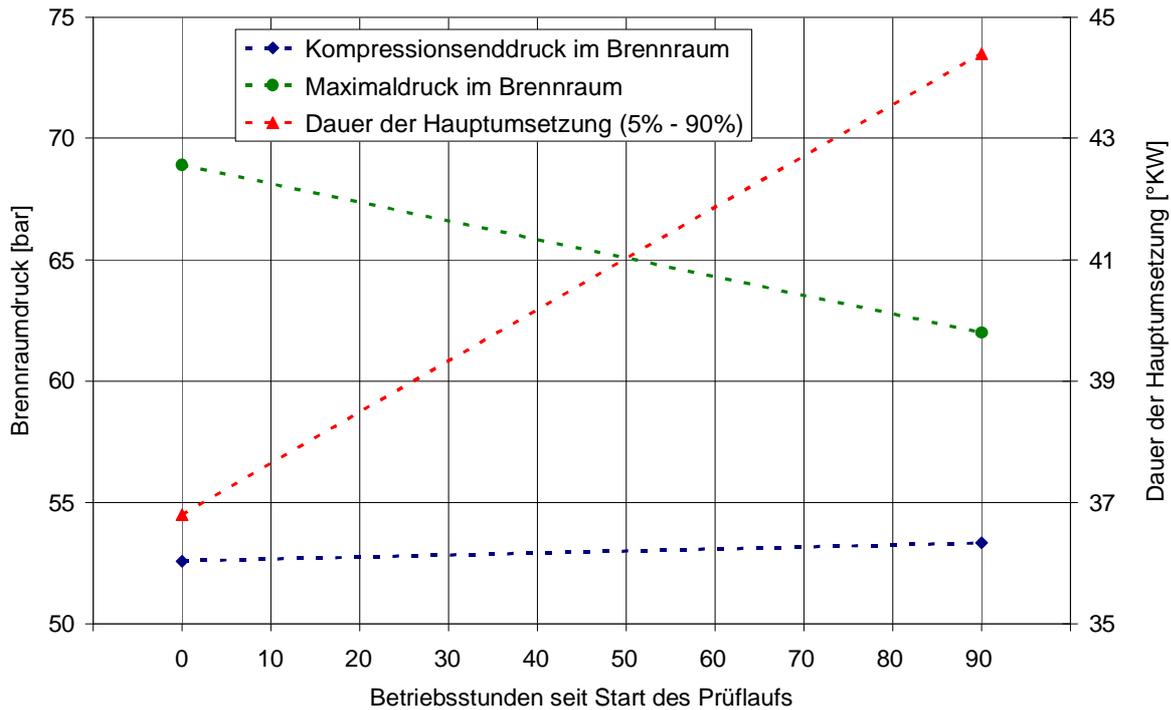


Abbildung 86: Einfluss von Brennraumablagerungen auf Brennraumdruck und Verbrennungsablauf

Die Ursache für den niedrigeren Maximaldruck am Ende des Prüflaufs liegt in einer langsamer ablaufenden Verbrennung, verursacht beispielsweise durch eine schlechte Gemischaufbereitung aufgrund von Ablagerungsbildung an der Einspritzdüse. Abbildung 87 zeigt den Summenheizverlauf zu Beginn und am Ende des Prüflaufs.

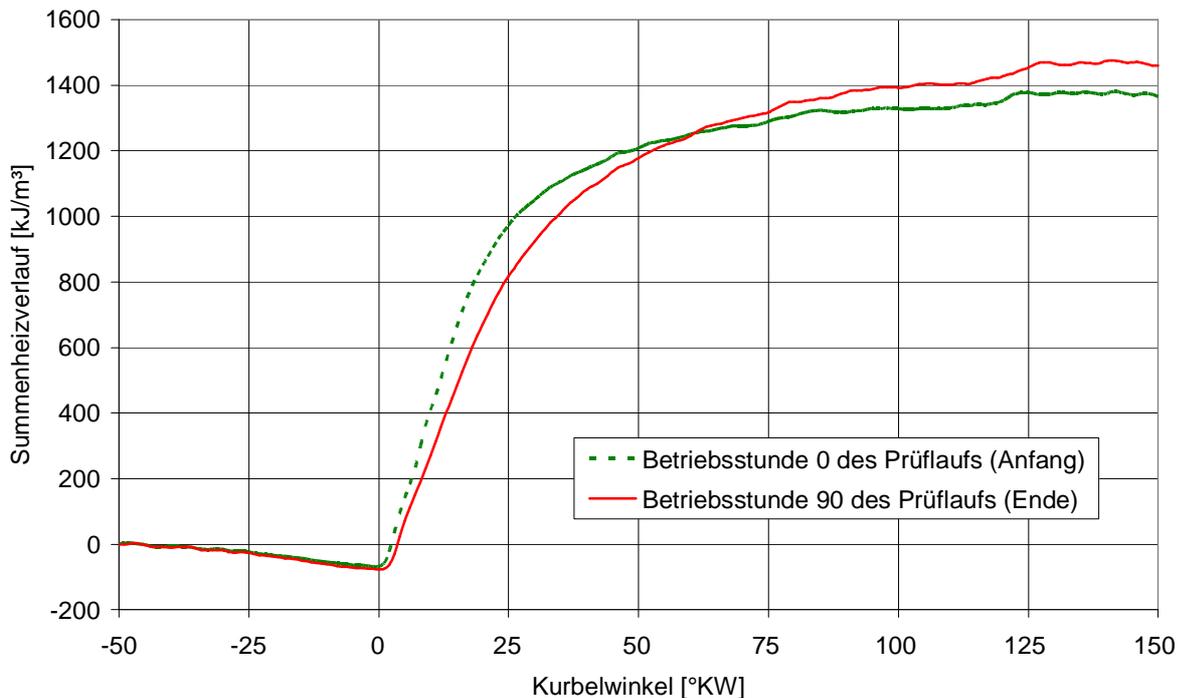


Abbildung 87: Einfluss von Brennraumablagerungen auf den Summenheizverlauf

Diese durch einen geänderten Verlauf der Verbrennung verursachte Änderung des Maximaldrucks wird durch den ebenfalls aus Ablagerungsbildung resultierenden höheren Maximaldruck in der Kompressionsphase nur in geringem Maße beeinflusst.

Nur in dem in der Realität äußerst unwahrscheinlichen Fall einer guten Gemischaufbereitung (d. h. nicht mit Ablagerungen belegten Einspritzdüse) bei gleichzeitiger starker Ablagerungsbildung im übrigen Brennraum könnten die aus höherem Druckniveau und den isolierenden Eigenschaften von Ablagerungen resultierenden höheren Gastemperaturen zu einer Verkürzung des Zündverzuges führen. Daraus würde sich ein höherer Maximaldruck im Zylinder ergeben. Diese Kombination konnte jedoch weder in eigenen Untersuchungen festgestellt werden, noch sind entsprechenden Hinweise in Veröffentlichungen anderer Autoren zu finden.

7.3 Ebene 3: Differenzierung in Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen an der Einspritzdüse

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, mit welchen Methoden Ablagerungsbildung im Abgasnachbehandlungssystem von Ablagerungsbildung im Brennraum unterschieden werden kann. Während bei Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem keine weitere Unterscheidung vorgenommen wird, ist bei Brennraumablagerungen eine weitere Differenzierung zwischen Einspritzdüse und übrigen Brennraum erforderlich, um die auftretenden Effekte eindeutig zuordnen zu können.

7.3.1 Laufunruhe

Ablagerungen an der Einspritzdüse werden generell für eine Änderung der hydraulischen Eigenschaften der Einspritzdüse und eine negativen Beeinflussung des Strahlbildes verantwortlich gemacht. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies zu einer ungleichmäßigeren Verbrennung führt. Die Frequenz dieser Ungleichmäßigkeit liegt beim Einzylinder-Viertaktmotor im Bereich der halben Motordrehzahl, d.h. Änderungen können sich von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel ergeben.

Um derartige Änderungen zu erfassen, muss die eingesetzte Messtechnik und Datenaufzeichnung ausreichend schnell und die Zeitkonstante der entsprechenden Messgrößen sehr klein sein.

Für die Untersuchung der Laufunruhe wurden die Drehzahl und der indizierte Mitteldruck für jedes Arbeitsspiel erfasst. Daraus wurde die Standardabweichung beider Größen für Gruppen von jeweils 20 direkt aufeinander folgenden Arbeitsspielen über einen Zeitraum von 60 Minuten am Anfang und am Ende eines Prüflaufs mit RÖK 5 berechnet.

Der Absolutwert der Standardabweichung zeigt somit den Unterschied zwischen den einzelnen Arbeitstakten von jeweils 20 direkt aufeinander folgenden Arbeitsspielen. Die Streubreite der Absolutwerte über 60 Minuten ermöglicht eine darüber hinaus gehende Beurteilung, ob sich im beobachteten Zeitraum signifikante Änderungen der Laufunruhe ergeben haben.

Abbildung 88 zeigt die Standardabweichung für die Motordrehzahl zu Beginn und am Ende des Prüflaufs. In diesem Zeitraum ist der Mittelwert von 0,29 auf 0,33 angestiegen, was einer Zunahme der Drehzahlschwankungen um 13 % entspricht.

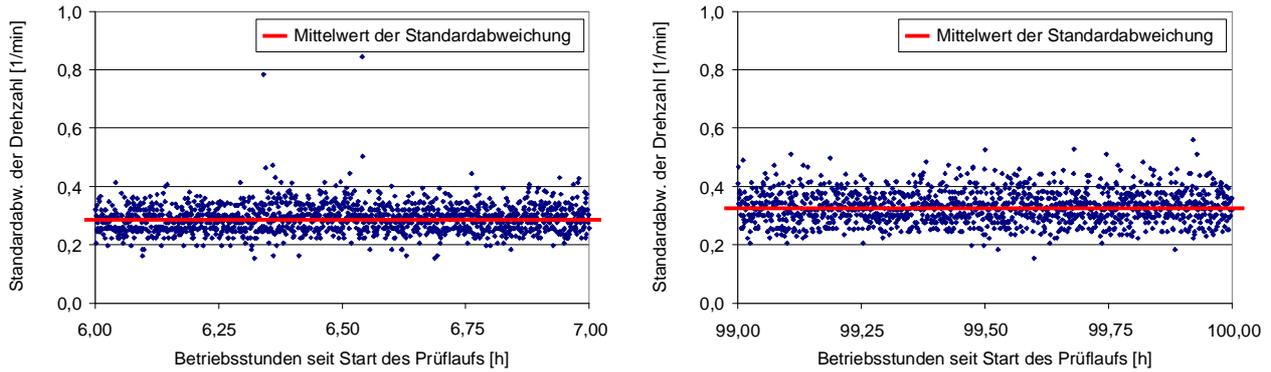


Abbildung 88: Standardabweichung der Motordrehzahl

Im gleichen Zeitraum beträgt die Zunahme der Schwankungen des Mitteldrucks 43 % (siehe Abbildung 89). Dies ist dadurch zu erklären, dass der Kurbeltrieb des untersuchten BHKW ein sehr großes Massenträgheitsmoment besitzt (Kurbeltrieb + Schwungrad + Zahnradstufe + Asynchrongenerator), außerdem wirkt das mit dem Asynchrongenerator verbundene Stromnetz als „aktive Schwungmasse“ (das Stromnetz versucht den Generator auf eine annähernd der Netzfrequenz entsprechende Drehzahl zu „ziehen“). Weiterhin erfolgte die Berechnung der Drehzahl über das gesamte Arbeitsspiel des Motors, während für die Berechnung des Mitteldrucks praktisch nur der Arbeitstakt von Bedeutung ist.

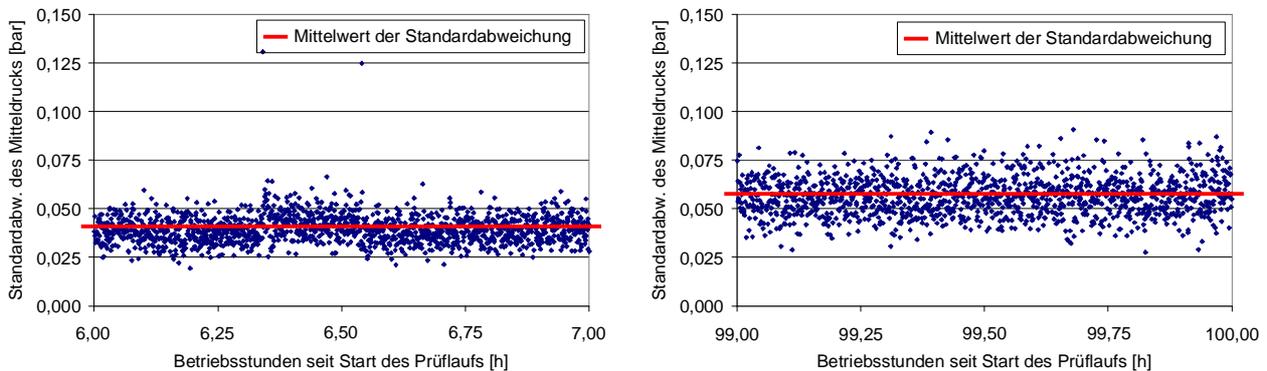


Abbildung 89: Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks

Die Zunahme der Unterschiede zwischen unmittelbar aufeinander folgenden Arbeitsspielen kann direkt mit einer Beeinflussung der Gemischaufbereitung und somit mit Belagsbildung an der Einspritzdüse in Verbindung gebracht werden.

Es ist äußerst unwahrscheinlich, dass „allgemeine“ Ablagerungen im Brennraum zu einer ähnlich hohen Dynamik im Laufverhalten eines Motors führen können, da diese keinen direkten Einfluss auf die Gemischbildung nehmen. Weiterhin ist das Auf- und Abbauverhalten dieser brennraumwandnahen Ablagerungen träge, ähnlich dem Verlauf der Ablagerungsbildung im Abgasnachbehandlungssystem.

7.4 Ebene 4: Differenzierung in Ablagerungen außen auf der Einspritzdüsenkuppe sowie innen in der Einspritzdüse

Die nachfolgend beschriebenen Verfahren zur differenzierten Erfassung der Ablagerungsbildung an der Einspritzdüse gehen davon aus, dass eine Belagsbildung sowohl im Spritzloch als auch außen auf der Düsenkuppe erfolgen kann. Auswirkungen können eine Reduzierung des hydraulischen Durchflusses und eine Beeinflussung der Strahlausbreitung sein. Eine differenzierte Kenntnis der unterschiedlichen Ablagerungsorte an der Einspritzdüse bildet die Grundlage, um die Belagsbildung entweder durch konstruktive Maßnahmen (z. B. gezielte Kavitation in den Spritzlöchern) oder ein entsprechendes Betriebsprofil beeinflussen zu können. Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass die chemische Zusammensetzung von Einspritzdüsenablagerungen abhängig vom Ort der Ablagerung und den herrschenden Umgebungsbedingungen ist. Aschehaltige Beläge bilden sich an anderen Stellen bzw. unter anderen Betriebsbedingungen als z. B. Verkokungen oder Verlackungen

Eine weitere Unterscheidung ist hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Ablagerungsbildung zu erwarten. So berichtet z. B. Hage [67], dass auch beim Betrieb eines Dieselmotors mit mineralischem Kraftstoff bereits nach wenigen Betriebsstunden eine messbare Verkokung der Einspritzdüse mit nicht aschehaltigen Ablagerungen auftritt, die sich jedoch sehr schnell stabilisiert.

Die Beeinflussung der Strahlausbreitung ist im Gegensatz zur Reduzierung des hydraulischen Durchflusses nicht bzw. nur sehr schwierig zu quantifizieren. Untersuchungen am befeuerten Motor erfordern optische Zugänge zum Brennraum. Zur alternativ möglichen optischen Beurteilung der Strahlausbreitung in Einspritzkammern muss der Prüflauf unterbrochen und die Einspritzdüse aus dem Motor ausgebaut werden. Dabei besteht bereits die Gefahr, dass Ablagerungen verändert werden. Weiterhin muss darauf geachtet werden, dass die Umgebungsbedingungen in der Einspritzkammer den realen Bedingungen im Motor möglichst nahe kommt. Entsprechende Untersuchungen wurden z. B. von Spicher und Lüft [164] durchgeführt.

Aus diesen Gründen wird nachfolgend zunächst der Einfluss unterschiedlicher hydraulischer Durchflüsse untersucht. Ziel ist es, die Auswirkungen veränderter hydraulischer Durchflüsse so genau beschreiben zu können, um damit die Teileffekte real auftretender Ablagerungsvorgänge quantifizieren zu können.

Da die untersuchten Einspritzdüsen über keine hydroerosive Verrundung verfügen, kann davon ausgegangen werden, dass auch bei neuen, nicht mit Ablagerungen belegten Einspritzdüsen Kavitationseffekte im Spritzloch auftreten. Der Einfluss von Ablagerungen im Spritzloch auf die Strahlausbreitung wird daher als gering angenommen. Eine Verifizierung dieser Annahme in weiterführenden Untersuchungen wird empfohlen. Dazu sollte versucht werden, von stark belasteten Einspritzdüsen ausschließlich die Ablagerungen außen auf der Düsenkuppe zu entfernen, um deren Auswirkungen isoliert zu betrachten.

Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass Ablagerungen im Spritzloch im Vergleich zu Ablagerungen auf der Düsenkuppe wesentlich stabiler gegen Abplatzvorgänge (siehe Kapitel 2.2.2.4) sind.

In den vorangegangenen Kapiteln wurden in der Regel nur einzelne, direkt messbare bzw. als Einzelgrößen in der Motorenforschung übliche Messwerte betrachtet. Dies ist für eine differenzierte Betrachtung der Belagsbildung an der Einspritzdüse nicht mehr ausreichend, so dass hier sowohl neue Kenngrößen definiert und ausgewertet werden als auch in einem weiteren Schritt die Änderung von Messgrößen über ein Arbeitsspiel untersucht wird.

Für die Untersuchungen wurden die in Tabelle 30 beschriebenen Einspritzdüsen verwendet.

Tabelle 30: Daten der untersuchten Einspritzdüsen

Einspritzdüsenbezeichnung	0,16	0,18
Einspritzdüsentyp	Sitzlochdüse	Sitzlochdüse
Anzahl Spritzlöcher	5	5
Spritzlochdurchmesser [mm]	0,16	0,18
Resultierende geometrische Spritzlochquerschnittsfläche [mm ²]	0,1005	0,1272
Mittelwert des hydraulischen Durchflusses (Herstellerangabe) [cm ³ /30 s]	293 (283 bis 303)	364 (351 bis 377)

Aus Tabelle 31 ist ersichtlich, dass zwischen der Herstellerangabe des hydraulischen Durchflusses und der resultierenden geometrischen Spritzlochquerschnittsfläche ein direkter Zusammenhang besteht. Folglich kann mittels einer geeigneten Methode zur Bestimmung des hydraulischen Durchflusses einer mit Ablagerungen beladenen Einspritzdüse eine Aussage zur durch Ablagerungsbildung reduzierten Querschnittsfläche getroffen werden.

Tabelle 31: Zusammenhang zwischen hydraulischem Durchfluss und geometrischer Spritzlochquerschnittsfläche – Einspritzdüse 0,18 im Vergleich zu 0,16

Einspritzdüse 0,18 im Vergleich zu Einspritzdüse 0,16	
Änderung geometrische Querschnittsfläche	+ 26,6 %
Änderung Q_{Hyd} (Mittelwert)	+ 24,2 %
Änderung Q_{Hyd} (Minimum)	+ 15,8 %
Änderung Q_{Hyd} (Maximum)	+ 33,2 %

Neben der nachfolgend untersuchten ablagerungsbedingten Veränderung des hydraulischen Durchflusses und der Beeinträchtigung der Zerstäubung durch Ablagerungsbildung ist es außerdem möglich, dass Ablagerungen in der Einspritzdüse zu einem undichten Nadelsitz und damit zu einem Nachtropfen der Düse führen können. Dies würde aufgrund der unvollständigen Verbrennung der auf diese Weise in den Brennraum eingebrachten Kraftstoffmenge hauptsächlich zu erhöhten CO- und THC-Emissionen führen. Sich ablösende Beläge aus dem Sitzbereich können zu einem spontanen Verstopfen eines oder mehrerer Spritzlöcher führen.

Da derartige Belagsbildung im Vergleich zur Reduzierung des hydraulischen Durchflusses und der Beeinflussung der Strahlausbreitung jedoch vergleichsweise selten auftritt, werden die Auswirkungen derartiger Beläge nachfolgend nicht weiter untersucht.

7.4.1 Einfluss des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse

Beim Ablagerungsaufbau an Einspritzdüsen wird neben dem Spritzbild auch der hydraulische Durchfluss der Einspritzdüse (Q_{Hyd}) beeinflusst. Die Ablagerungen verengen den freien Spritzlochquerschnitt, wodurch die Einspritzdauer ansteigt. Gleichzeitig erhöht sich der Druck in der Einspritzleitung. Abbildung 90 zeigt dies exemplarisch am Vergleich zweier Einspritzdüsen mit unterschiedlichem Spritzlochdurchmesser beim Betrieb im gleichen Betriebspunkt.

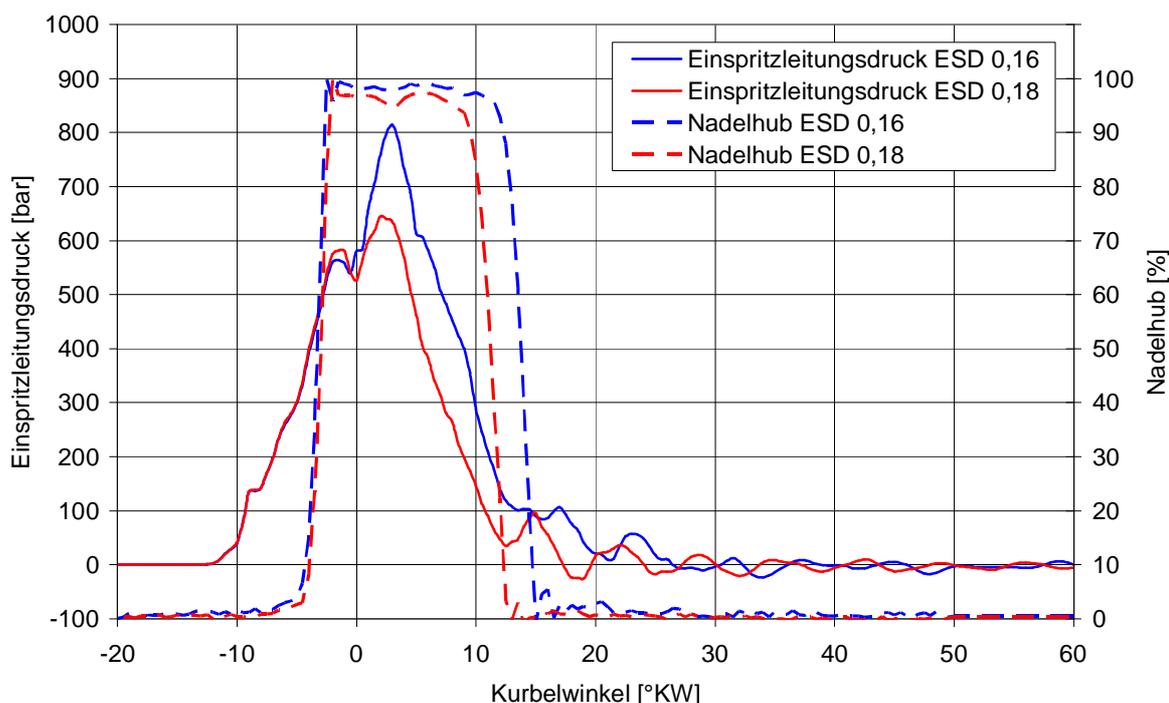


Abbildung 90: Einfluss des hydraulischen Durchflusses auf Einspritzdauer und Einspritzdruckverlauf

Ziel der Untersuchungen ist es, Modelle zu entwickeln, mit denen anhand von Zylinderdruck, Einspritzleitungsdruck, Nadelhub sowie des gemessenen Kraftstoffverbrauchs Änderungen des hydraulischen Durchflusses bei laufendem Motor erfasst werden können. Der hydraulische Durchfluss einer Einspritzdüse wird heute üblicherweise durch eine stationäre Durchströmung mit einem Prüffluid ermittelt. Dabei wird der Volumenstrom durch die Einspritzdüse bei einer Druckdifferenz von 100 bar über 30 Sekunden aufsummiert.

Eine Bestimmung des tatsächlichen hydraulischen Durchflusses $Q_{Hyd,real}$ bei laufendem Motor ist grundsätzlich durch die Auswertung hydraulischer Kenngrößen möglich. Bei dieser Betrachtung werden die primären Effekte von Ablagerungsbildung erfasst (siehe Kapitel 2.2.3).

Im Gegensatz zur volumenstrombasierten Bestimmung des hydraulischen Durchflusses auf einem Einspritzdüsenprüfstand erfolgt die Online-Ermittlung bei laufendem Motor aufgrund der am Prüfstand vorhandenen Messtechnik auf Basis des Massenstroms. Es gilt die Annahme, dass sich beide Größen proportional zueinander ändern.

Zur Bestimmung des tatsächlichen hydraulischen Durchflusses wird zunächst ein auf der Einspritzdauer, dem Einspritzdruckverlauf sowie dem Zylinderdruckverlauf basierendes Modell erstellt, mit dem der theoretisch zu erwartende Kraftstoffverbrauch bei neuer Einspritzdüse berechnet wird (Kapitel 7.4.1.1). Dieses Modell wird in Kapitel 7.4.1.2 auf den kurbelwinkelunabhängigen Maximaldruck in der Einspritzleitung und die Einspritzdauer redu-

ziert, um die Berechnung des theoretisch zu erwartenden Kraftstoffverbrauchs auch mit serien-tauglicher Messtechnik zu realisieren.

Anhand des Verhältnisses zwischen real gemessenem und theoretisch zu erwartendem Kraftstoffverbrauch und dem hydraulischen Durchfluss im Neuzustand kann der reale hydraulische Durchfluss der Einspritzdüse berechnet werden:

$$Q_{\text{Hyd,real}} = \frac{Q_{\text{Hyd,Düse neu}} \cdot \dot{m}_{\text{real}}}{\dot{m}_{\text{Düse neu,theor}}} \quad (8)$$

Von der stationären Bestimmung des hydraulischen Durchflusses unterscheiden sich die beiden Online-Verfahren in folgenden Punkten:

- Bei den Online-Verfahren wird der hydraulische Durchfluss anhand eines Massenstroms berechnet.
- Bei der stationären Durchströmung ist der Druck vor dem Einspritzdüsenhalter konstant, bei der Online-Ermittlung in Kombination mit einemnockengesteuerten Einspritzsystem dagegen variabel (an- und abschwelend). Weiterhin erfolgt zwischen Einspritzpumpe und Einspritzdüse eine Druckerhöhung (hervorgerufen durch Reflektion der von der Pumpe ausgehenden Druckwelle), die zwar direkt vor dem Eintritt in den Düsenhalter gemessen werden kann, deren weitere Entwicklung im Düsenhalter jedoch messtechnisch nur noch sehr schwer zu erfassen ist.
- Im realen Motor ist während der Einspritzphase sowohl der Druck auf der Kraftstoffseite der Einspritzdüse als auch der entgegenwirkende Brennraumdruck nicht konstant. Bei der stationären Durchströmung herrschen dagegen auf beiden Seiten der Spritzlöcher konstante Drücke.
- Bei der stationären Durchströmung beträgt das Druckniveau 100 bar, beim untersuchten Motor treten im Betrieb am Eintritt des Düsenhalters bis zu 800 bar auf. Dennoch wird in oben genannter Gleichung zur Bestimmung der Einspritzrate von einer Inkompressibilität des Mediums ausgegangen.
- Während der Öffnungs- und Schließphase der Düsennadel treten zusätzlich zu den Drosseffekten am Spritzloch weitere derartige Effekte im Bereich des Nadelsitzes auf, die den Kraftstoffdurchfluss beeinflussen. Dies ist bei der stationären Durchströmung nicht der Fall.

Aufgrund dieser Unsicherheiten sind bei der Online-Ermittlung zur klassischen stationären Durchströmung abweichende Ergebnisse zu erwarten. Dennoch sollte überprüft werden, inwieweit eine Bestimmung des hydraulischen Durchflusses unter den Randbedingungen

- konstanter Betriebspunkt (Drehzahl, Last normiert)
- nockengesteuertes Einspritzsystem
- konstanter Förder- und Einspritzbeginn

möglich ist.

7.4.1.1 Modell zur Online-Bestimmung des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse

Basierend auf der zeitlich hochaufgelösten Auswertung des Druckverlaufs in der Einspritzleitung wird im nachfolgend vorgestellten Verfahren der theoretisch zu erwartende Einspritzverlauf einer Einspritzdüse berechnet. Dazu wird der düsenseitig in der Einspritzleitung herrschende Druck in diskrete Einspritzraten in Zeiteinheiten von 0,5 °KW umgerechnet. Diese Teilkraftstoffmengen werden anschließend über der Öffnungszeit der Einspritzdüse zu einem theoretischen Kraftstoffverbrauch aufsummiert und mit dem tatsächlichen Kraftstoffverbrauch des Motors zum jeweiligen Zeitpunkt verglichen.

Ist der reale Kraftstoffverbrauch niedriger als der theoretisch aufgrund des Druckverlaufs und der Öffnungszeit zu erwartende, kann davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche Öffnungsquerschnitt der Einspritzdüse durch Ablagerungsbildung verringert wurde.

Der Berechnung liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- Inkompressibilität des Kraftstoffs; Dichte $\rho = 0,92 \text{ kg/l}$ (Rapsölkraftstoff)
In der Realität wird der Kraftstoff durch die hohen Drücke etwas komprimiert, daher wird der errechnete theoretische Kraftstoffverbrauch als tendenziell zu gering erwartet.
- Der Druckverlauf in der Einspritzdüse wird gleich dem Druckverlauf am Eintritt in den Düsenhalter angenommen, da keine direkte Druckmessung in der Einspritzdüse möglich war.
- Der brennraumseitig aufgebaute Gegendruck wirkt dem Einspritzdruck entgegen und reduziert daher den maßgeblichen Differenzdruck.
- Drosselverluste im Nadelsitz während der Öffnungs- und Schließphasen der Düsen-nadel werden nicht berücksichtigt. Stattdessen findet eine vergleichende Betrachtung für einen Öffnungszeitraum ab 10 %, 20 % und 90 % Öffnungshub statt.
- Für die Zeit der Düsenöffnung wird eine konstante Motordrehzahl angenommen, auf deren Basis kurbelwinkelbezogene Druckverläufe in diskrete Zeitintervalle aufgeteilt werden.

Für beide Einspritzdüsen ist der stationär ermittelte hydraulische Durchfluss bekannt. Daraus berechnet sich der Massenstrom im Referenzpunkt wie folgt:

$$\dot{m}_{\text{ref}} = Q_{\text{Hyd}} * \rho \quad (9)$$

Nach Angabe des Düsenherstellers gilt folgender Zusammenhang zwischen dem Druck in der Einspritzdüse und dem sich einstellenden Kraftstoffmassenstrom.

$$\dot{m}(p) = \sqrt{\frac{p_{\text{ESD}}}{p_{\text{ESD,ref}}}} * \dot{m}_{\text{ref}} \quad (10)$$

Mit Rapsölkraftstoff stellt sich dieser Zusammenhang für die zwei untersuchten Einspritzdüsen wie in Abbildung 91 gezeigt dar.

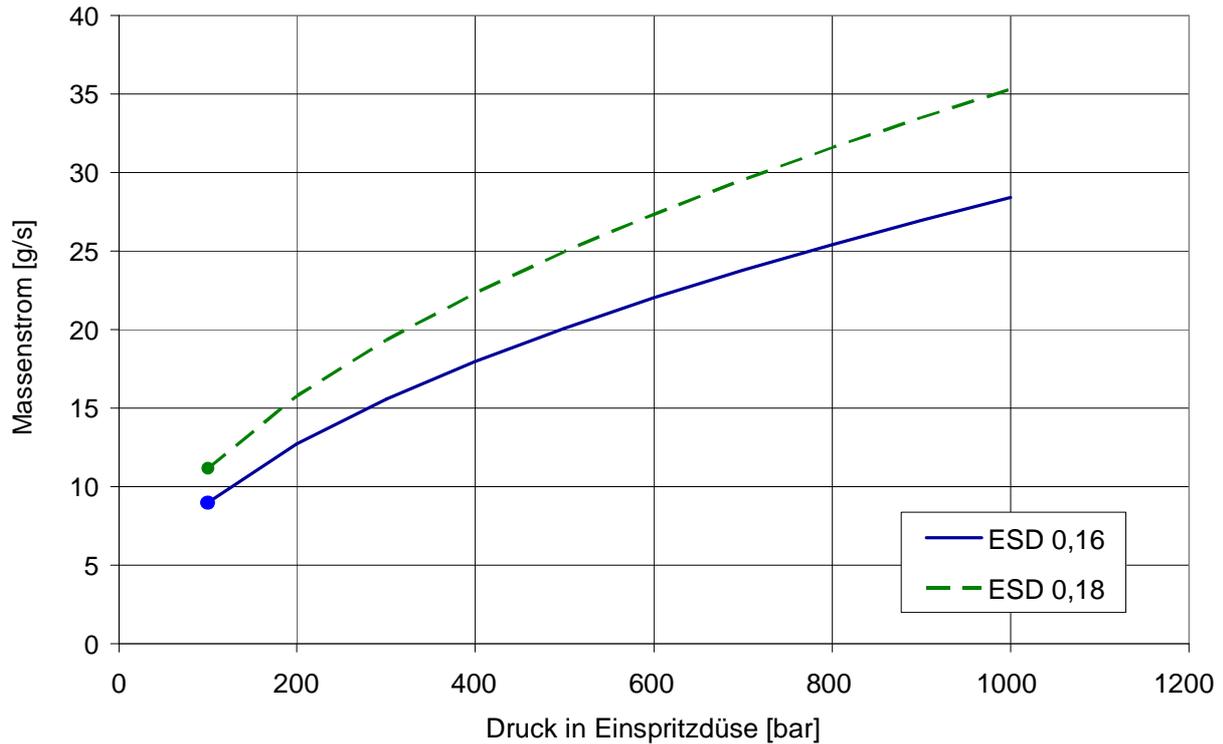


Abbildung 91: Einspritzrate der untersuchten Einspritzdüsen in Abhängigkeit des Kraftstoffdrucks – Messpunkte und berechneter Verlauf in Abhängigkeit des Drucks

Die aufgrund der Auflösung des Kurbelwinkelsignals kleinstmögliche Schrittweite von $0,5^\circ\text{KW}$ berechnet sich wie folgt:

$$t_{0,5^\circ\text{KW}} = \frac{1}{n_{\text{Motor}} * 720} \quad (11)$$

Mit diesen Annahmen lässt sich die theoretisch eingespritzte Kraftstoffmasse pro Hub wie folgt berechnen:

$$m_{\text{Hub,theor.}} = \sum_{\varphi_{\text{inj_Beginn}}^{\varphi_{\text{inj_Ende}}} \left(\sqrt{\frac{p_{\text{ESD}}(\varphi) - p_{\text{Zyl}}(\varphi)}{p_{\text{ESD,ref}}}} * Q_{\text{Hyd}} * \rho * t_{0,5^\circ\text{KW}} \right) \quad (12)$$

Bei einer als konstant angenommenen Motordrehzahl ergibt sich daraus ein theoretischer Kraftstoffverbrauch von:

$$\dot{m}_{\text{b,theor.}} = m_{\text{Hub,theor.}} * n_{\text{Motor}} * i \quad (13)$$

Zur Bestimmung einer geeigneten Nadelhubschwelle wird die theoretisch eingespritzte Kraftstoffmasse pro Hub anhand des Betriebspunktes $n = 2450 \text{ min}^{-1}$, $P_{\text{el}} = 4970 \text{ W}$ und einer Einspritzdüse 0,16 für eine Einspritzdauer entsprechend einem Nadelhub $> 10\%$, $> 20\%$ und $> 90\%$ berechnet:

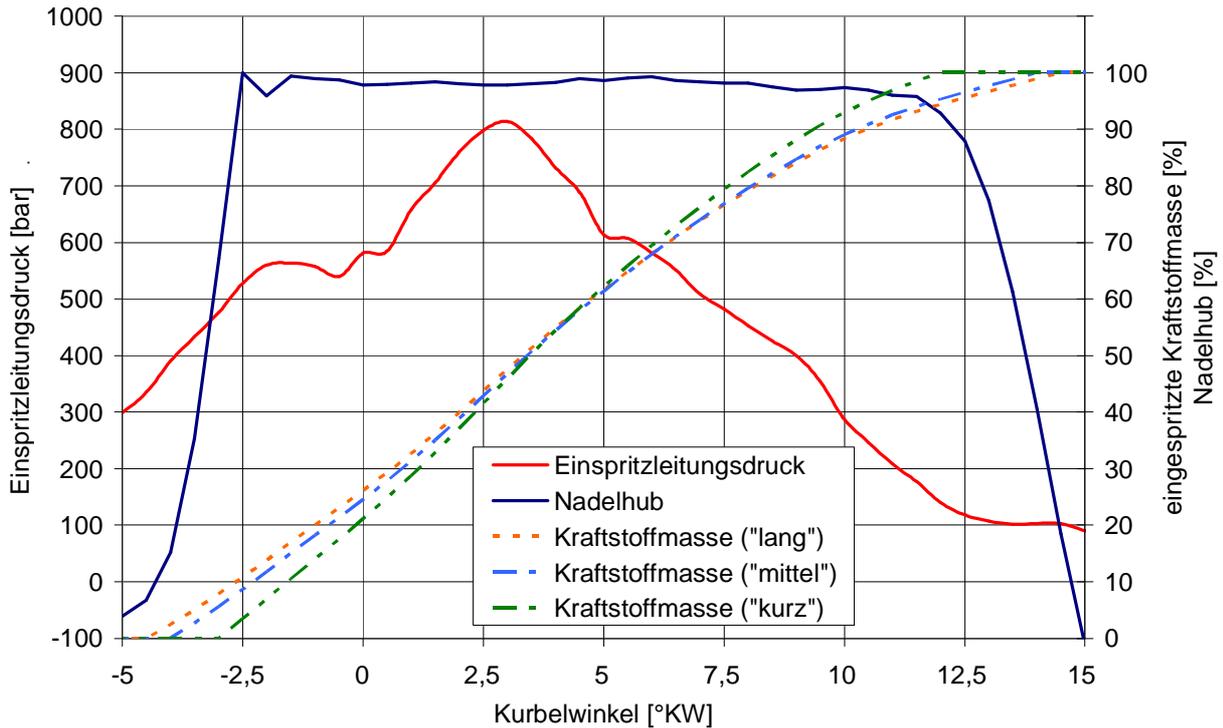


Abbildung 92: Verlauf von Einspritzleistungsdruck (gemessen), Nadelhub (gemessen) und daraus berechneter eingespritzter Kraftstoffmasse über der Dauer des Einspritzvorgangs

Diese prinzipielle Vorgehensweise wurde anhand von fünf Betriebspunkten im Detail untersucht. Wie in der Beispielrechnung bereits gezeigt, hat die gewählte Einspritzdauer großen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung des Kraftstoffverbrauchs. Für die fünf untersuchten Betriebspunkte wurden daher die Schwellenwerte 10 %, 20 % und 90 % des Düsenadelhubs als Anfangs- und Endgrenze für die Einspritzdauer vergleichend betrachtet.

In Abbildung 93 und Abbildung 94 sind für die beiden untersuchten Einspritzdüsen 0,16 und 0,18 jeweils der gemessene Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Generatorleistung dargestellt. Zusätzlich dazu die mittels des Einspritzdruckverlaufs berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuche in Abhängigkeit des gewählten Schwellenwerts für die Dauer der Einspritzung.

In beiden Fällen zeigt die Berechnung für eine Einspritzdauer ab einem Nadelhub größer 10 % eine sehr gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Verbrauch.

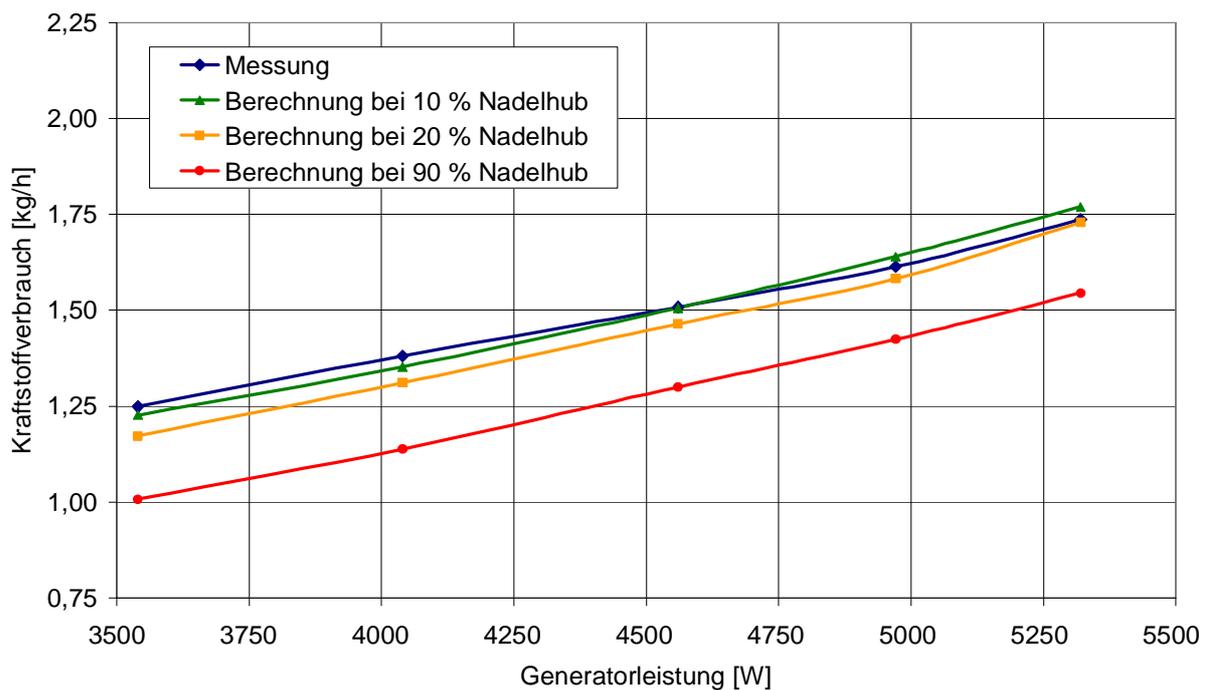


Abbildung 93: Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,16

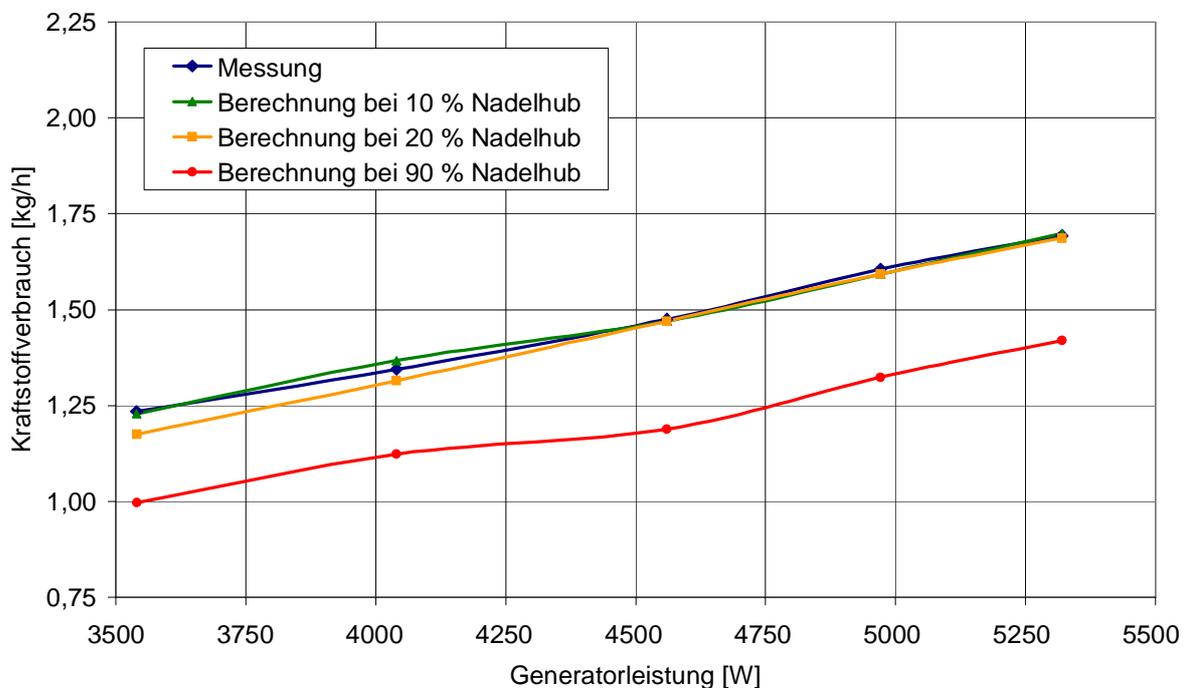


Abbildung 94: Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,18

Bei einer Reduzierung des hydraulischen Durchflusses durch Ablagerungen fällt der theoretische Kraftstoffverbrauch höher aus als der real gemessene. Über diese Differenz lässt sich eine Änderung des hydraulischen Durchflusses erkennen bzw. bei weiterer Feinabstimmung des Modells auch quantifizieren. Abbildung 95 zeigt dies beispielhaft an einer Einspritzdüse mit einem Spritzlochdurchmesser von 0,18 mm in Neuzustand, welcher durch Ablagerungen auf 0,16 mm reduziert wurde.

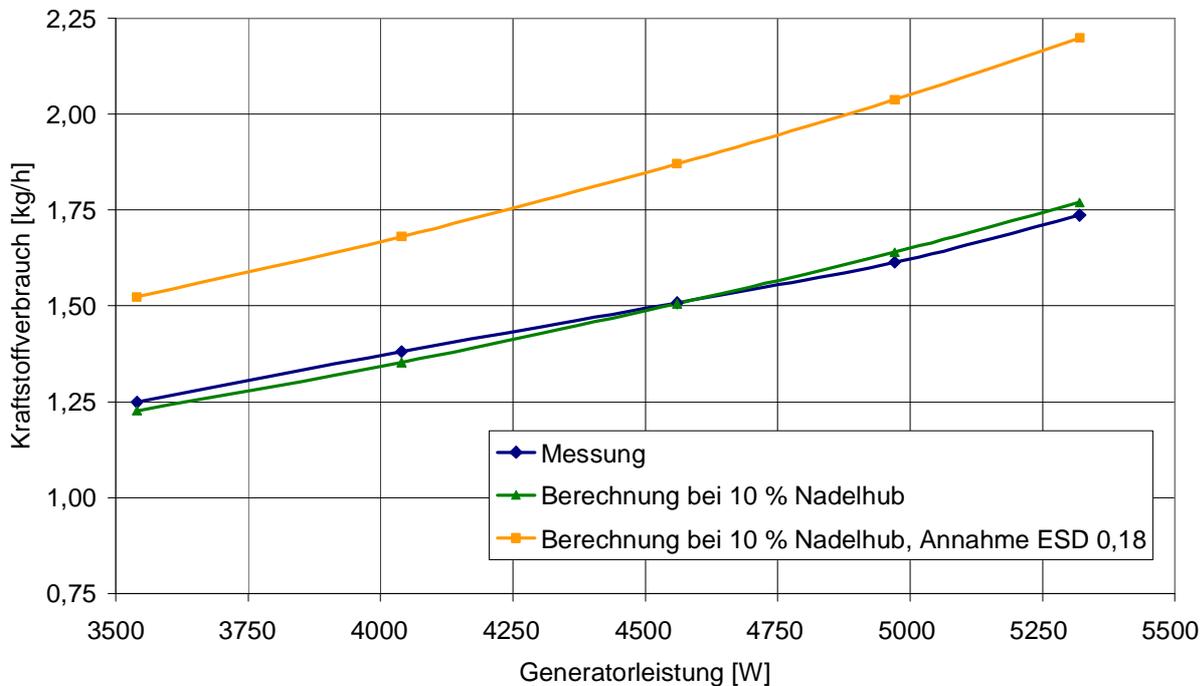


Abbildung 95: Tatsächlicher und berechneter Kraftstoffverbrauch bei einer „ideal verkoteten“ Einspritzdüse (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele)

Die Bestimmung des tatsächlichen hydraulischen Durchflusses für den Betriebspunkt mit $P_{el} = 4970 \text{ W}$ ergibt damit:

$$Q_{\text{hyd,real}} = \frac{364 \frac{\text{cm}^3}{30\text{s}} * 1,61 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{2,04 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 287,3 \frac{\text{cm}^3}{30\text{s}} \quad (8a)$$

Zum Vergleich: Herstellerangabe $Q_{\text{Hyd}} = 293 \text{ cm}^3/30 \text{ s}$ ($\pm 10 \text{ cm}^3/30 \text{ s}$)

Der Vergleich zeigt, dass die Online-Bestimmung des hydraulischen Durchflusses möglich ist, sofern Kraftstoffverbrauch, Einspritzleitungsdruckverlauf, Brennraumdruckverlauf und Nadelhubverlauf (bzw. mindestens Einspritzbeginn und -dauer bei 10 % Nadelhub) bekannt sind.

Trotz der noch vorhandenen Ungenauigkeit der Phasen des Nadelöffnens und -schließens und des anstelle des Kraftstoffdrucks in der Einspritzdüse verwendeten Einspritzleitungsdrucks lässt sich der tatsächliche hydraulische Durchfluss bei Wahl einer geeigneten Nadelöffnungsschwelle ausreichend genau bestimmen.

Die Erfassung und Verarbeitung der dafür erforderlichen Messdaten ist am Motorenprüfstand realisierbar, eine Anwendung an ausgeführten Serienmotoren ist jedoch mit der heute üblichen Messtechnik und Rechenkapazität der Steuergeräte nicht möglich. Aus diesem Grund soll im

nachfolgenden Kapitel überprüft werden, ob ein alternativer vereinfachter Modellansatz zu ähnlichen Ergebnissen führen kann.

7.4.1.2 Vereinfachtes Ersatzmodell zur Online-Bestimmung des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse

Basierend auf der detaillierten Betrachtung von Einspritzleitungsdruckverlauf, Brennraumdruckverlauf und Düsennadelbewegung sollte geprüft werden, ob durch eine vereinfachte Auswertung des Einspritzleitungsdruckverlaufs und des Nadelhubsignals eine ausreichend genaue Bestimmung des hydraulischen Durchflusses möglich ist.

Dem Modell liegt die Annahmen zu Grunde, dass der Einspritzvorgang durch die Größen Einspritzbeginn, Einspritzende und Maximaldruck in der Einspritzleitung ausreichend genau beschrieben werden kann. Dies bedeutet im Einzelnen:

- Der Druckverlauf des untersuchten Einspritzsystems beinhaltet charakteristische Eigenschaften vonnocken- bzw. kantengesteuerten Einspritzsystemen, eine Übertragbarkeit auf andere Einspritzsysteme (z. B. Speichereinspritzsysteme – Common-Rail) ist daher nicht gegeben.
- Der Druckverlauf in der Einspritzleitung bleibt von der Form her immer gleich („kleines Maximum vor Nadelöffnung; großes, absolutes Maximum während der Nadelöffnungsphase“).
- Der brennraumseitige Gegendruck kann vernachlässigt werden.

Der typische Druckverlauf einesnockengesteuerten Einspritzsystems ist aus Abbildung 90 (Kapitel 7.4.1) ersichtlich. Dieser Druckverlauf kann mit ausreichender Genauigkeit mit einer Dreiecksform beschrieben werden. Um auf die hochaufgelöste Zuordnung des Einspritzleitungsdrucks zum Kurbelwinkel verzichten zu können, soll die vom Druckverlauf beschriebene Dreiecksfläche durch eine Ersatzfläche mit konstantem Maximaldruck ersetzt werden. Durch eine derartige Vereinfachung wird der Zusammenhang von Einspritzrate und Einspritzleitungsdruck linearisiert. Dies ist für die Erkennung von durch Ablagerungen verursachte Änderungen jedoch zulässig, da sich in diesem Fall relevante Änderungen des Maximaldrucks im Bereich von ca. 50 bar bewegen (siehe dazu Abbildung 91).

Für dasnockengesteuerte Einspritzsystem wurde die Annahme getroffen, dass eine Rechteckfläche mit der Höhe $p_{\text{Ersatz}} = 2/3 * p_{\text{max}}$ und einer Länge entsprechend der Einspritzdauer vom Flächeninhalt der vom ursprünglichen Einspritzdruckverlauf beschriebenen Dreiecksfläche entspricht.

$$p_{\text{Ersatz}} = \frac{2}{3} * p_{\text{max}} \quad (14)$$

In Anlehnung an Gleichung 10 berechnet sich der dem Ersatzdruck entsprechende Massenstrom durch die Einspritzdüse wie folgt:

$$\dot{m}_{\text{pErsatz}} = \sqrt{\frac{p_{\text{Ersatz}}}{p_{\text{ESD,ref}}}} * \dot{m}_{\text{ref}} \quad (15)$$

Für die Berechnung der Düsenöffnungszeit gilt:

$$t_{\text{inj}} = t_{\text{inj_Ende}} - t_{\text{inj_Beginn}} \quad (16)$$

Daraus ergibt sich die Kraftstoffmasse pro Einspritzvorgang als:

$$m_{\text{Hub,theor.}} = \dot{m}_{\text{P}_{\text{Ersatz}}} * t_{\text{inj}} \quad (17)$$

Die Berechnung des daraus resultierenden Kraftstoffverbrauchs entspricht der Berechnung aus Kapitel 7.4.1.1:

$$\dot{m}_{\text{b,theor.}} = m_{\text{Hub,theor.}} * n_{\text{Motor}} * i \quad (14)$$

Zur Überprüfung dieser Annahmen wurden wie in Kapitel 7.4.1.1 der Verlauf des gemessenen Kraftstoffverbrauchs und die anhand des Maximaldrucks in der Einspritzleitung berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuche in Abhängigkeit des gewählten Schwellenwerts für die Dauer der Einspritzung in verschiedenen Betriebspunkten verglichen.

Abbildung 96 zeigt für die Einspritzdüse 0,16 zunächst den gemessenen Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Generatorleistung sowie den mittels dem in Kapitel 7.4.1.1 vorgestellten Verfahren anhand des Druckverlaufs berechneten theoretischen Kraftstoffverbrauch („Berechnung bei 10 % Nadelhub“). Weiter dargestellt ist der aus der Annahme des Ersatzdrucks resultierende theoretische Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des gewählten Schwellenwerts für den Einspritzzeitraum. Ein Unterschied zwischen dem Ersatzdruck und einem korrigierten Ersatzdruck ist bei dieser Einspritzdüse nicht zu erkennen, daher werden die Unterschiede zwischen beiden Drücken erst anhand der nachfolgend betrachteten Einspritzdüse 0,18 erläutert.

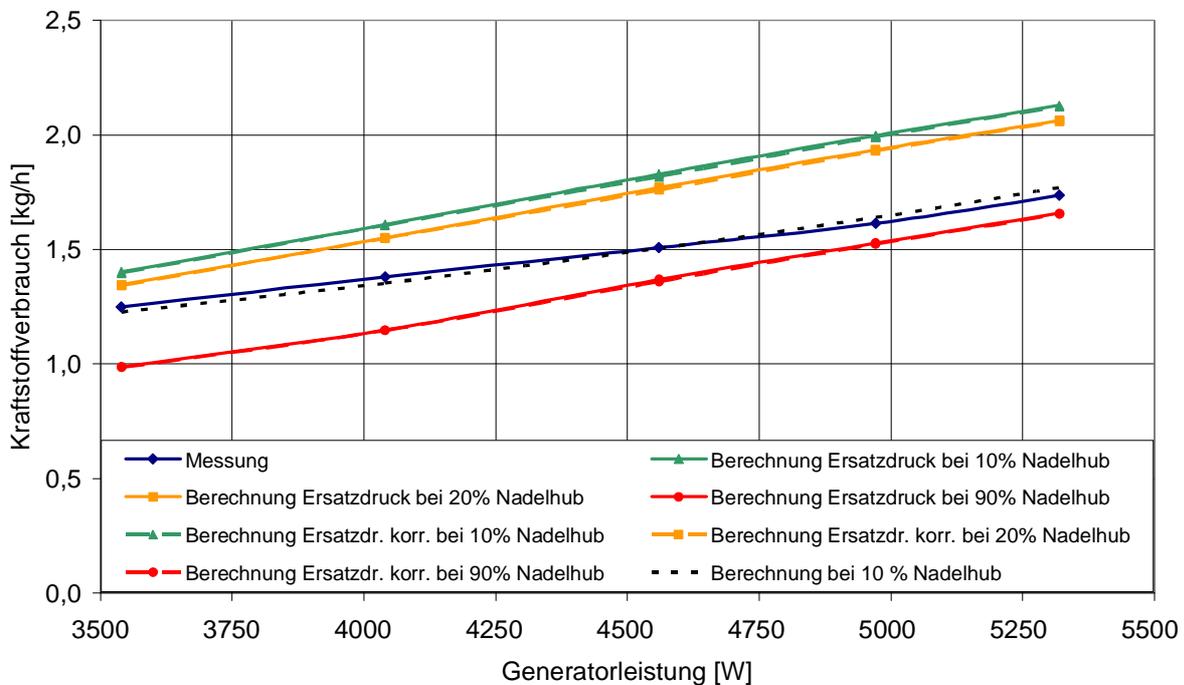


Abbildung 96: Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,16

Zu erkennen ist, dass sich zwar die grundsätzliche Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der Generatorleistung in allen Fällen gleichermaßen ergibt, jedoch sowohl Steigung als auch Absolutwert des mittels eines Ersatzdrucks berechneten theoretischen Kraftstoffverbrauchs nicht mit dem gemessenen Verbrauch übereinstimmen.

Die entsprechende Auswertung der Einspritzdüse 0,18 (Abbildung 97) zeigt zusätzlich zu den bereits beschriebenen Abweichungen deutliche Unterschiede zwischen den korrigierten und den nicht korrigierten Druckwerten. Diese resultieren daher, dass bei dieser Einspritzdüse bei niedrigen Generatorleistungen (und damit geringen Einspritzmengen) das erste Druckmaximum vor der Nadelöffnung größer ist als das für den Einspritzverlauf relevante zweite Druckmaximum während der Einspritzphase. Daraus ergibt sich bei einer ausschließlichen Betrachtung des absoluten Druckmaximums für niedrige Generatorleistungen ein zu hoher theoretischer Kraftstoffverbrauch. Die Berechnung des korrigierten Ersatzdrucks basiert daher auf dem zweiten Druckmaximum während der Einspritzphase.

Auch bei der Einspritzdüse 0,18 stimmen sowohl Steigung als auch Absolutwert des mittels eines Ersatzdrucks berechneten theoretischen Kraftstoffverbrauchs nicht mit dem gemessenen Verbrauch überein.

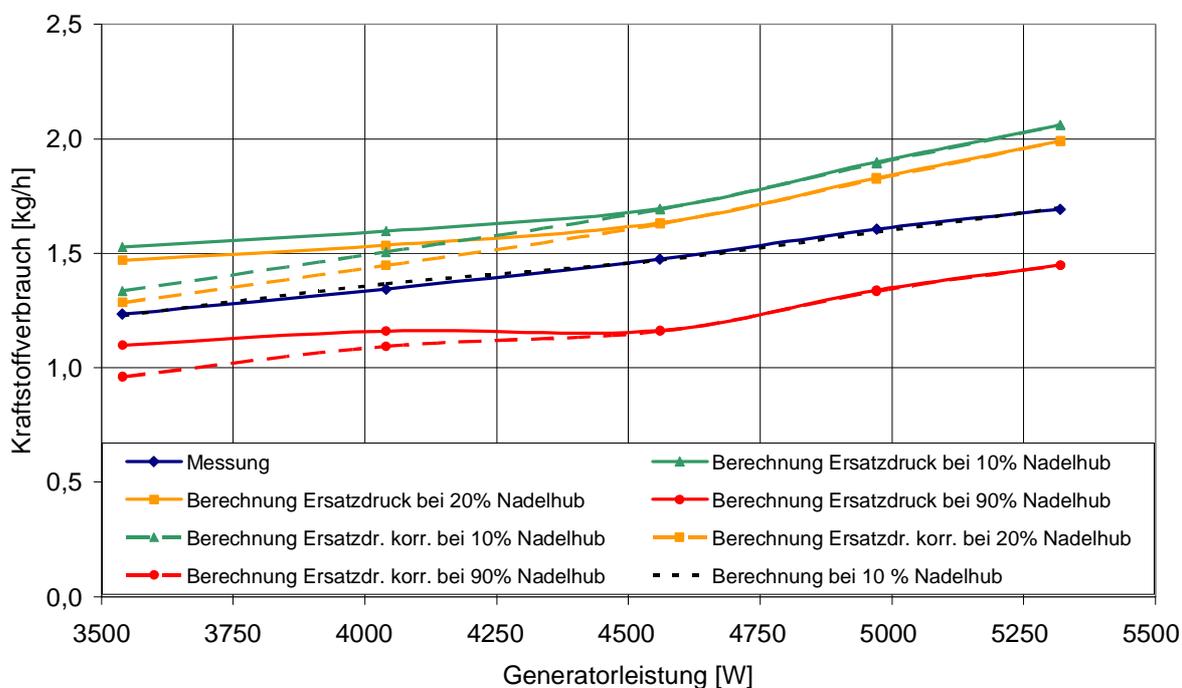


Abbildung 97: Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,18

Abbildung 98 und Abbildung 99 zeigen den Verlauf des „Abweichungsquotienten“ (Rechnung/Messung) zwischen theoretischem und gemessenem Kraftstoffverbrauch. Mit ausreichender Näherung kann dabei für beide untersuchten Einspritzdüsentypen ein Faktor von ca. 1,2 als konstant angenommen werden.

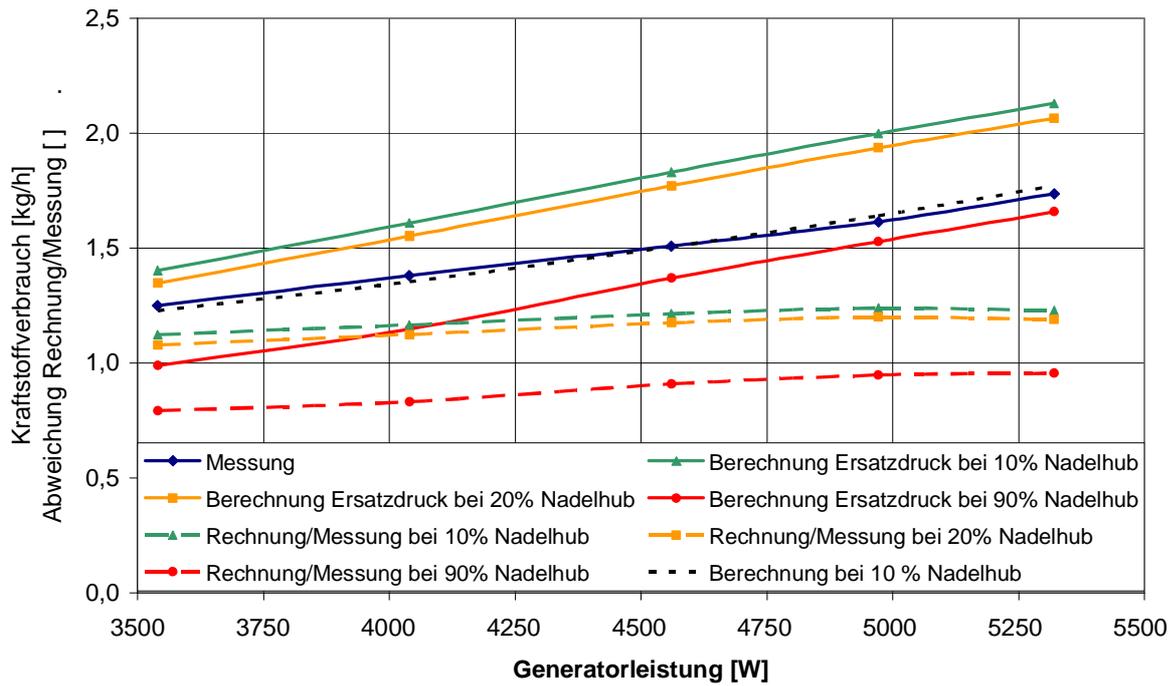


Abbildung 98: Abweichungsquotienten zwischen theoretischem und gemessenen Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,16

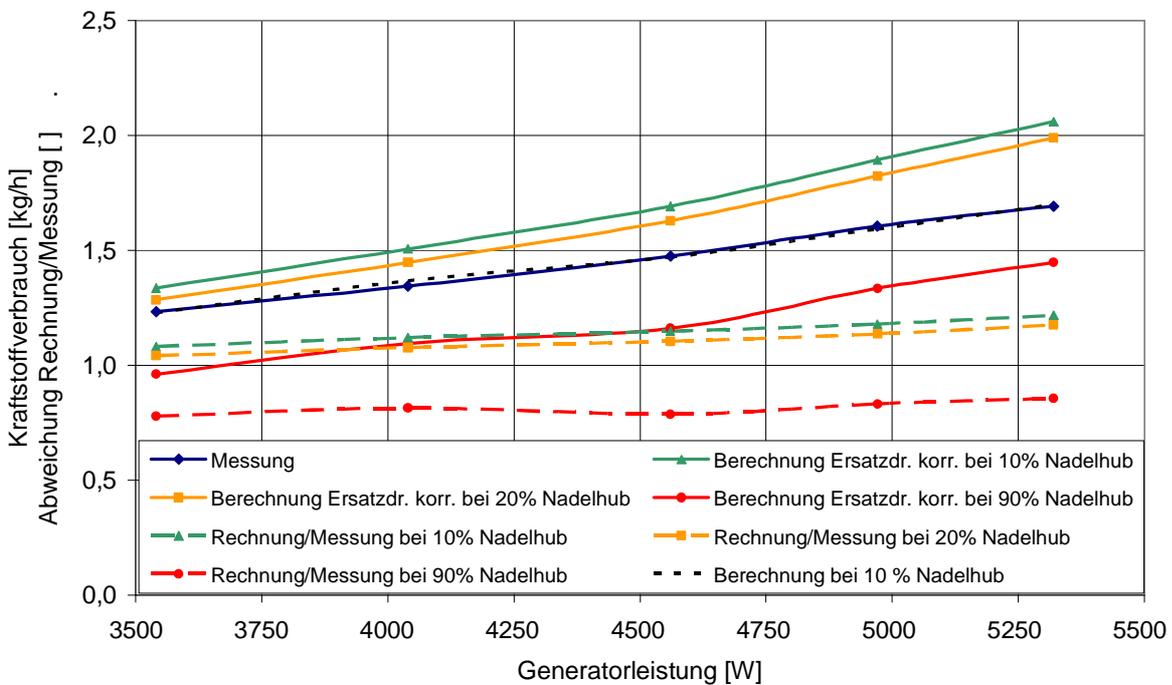


Abbildung 99: Abweichungsquotienten zwischen theoretischem und gemessenen Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,18

Analog zu dem in Kapitel 7.4.1.1 durchgeführten Vergleich zwischen einer neuen und einer „ideal verkokt“ (von 0,18 mm auf 0,16 mm Spritzlochdurchmesser) angenommenen Einspritzdüse ist in Abbildung 100 der gemessene und theoretische Kraftstoffverbrauch unter Verwendung des vereinfachten Modellansatzes dargestellt. Es wurde ein Korrekturfaktor von 1,2 gewählt.

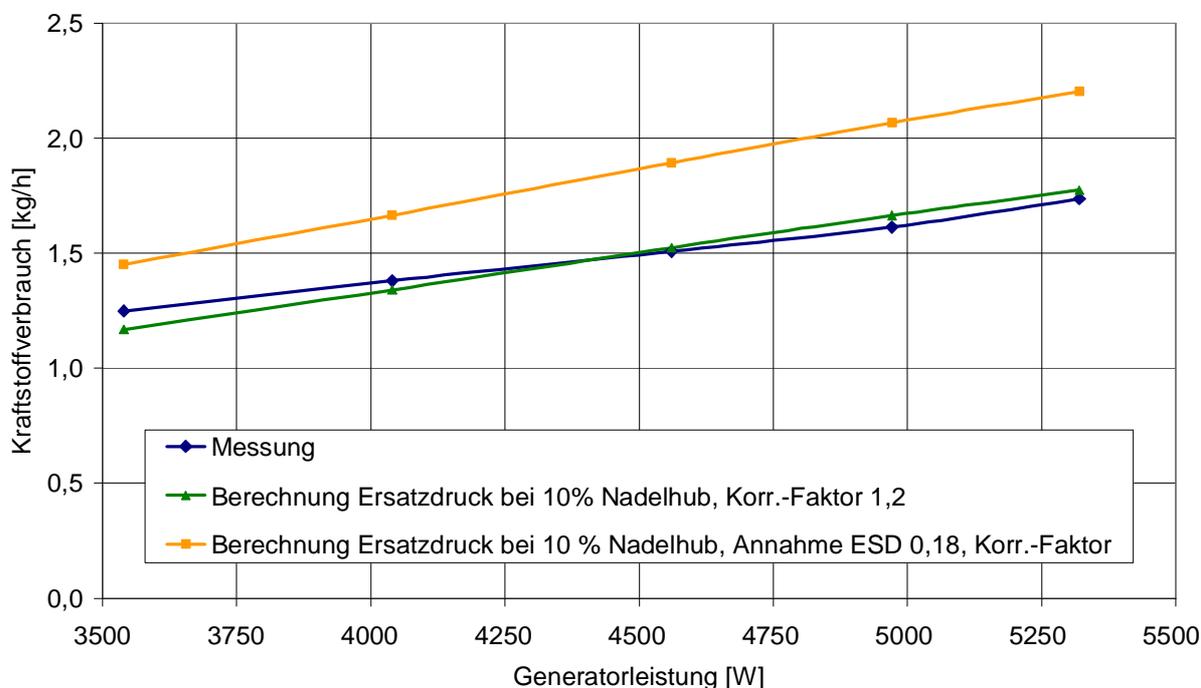


Abbildung 100: Tatsächlicher und berechneter Kraftstoffverbrauch bei einer „ideal verkokten“ Einspritzdüse - vereinfachter Modellansatz (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele)

Abbildung 100 zeigt, dass bei der Betrachtung des Stationärbetriebs mit nur kleinen Leistungsänderungen das vereinfachte Verfahren ausreichend genau ist.

Anhand einer Generatorleistung von $P_{el} = 4970 \text{ W}$ ergibt sich für den hydraulischen Durchfluss:

$$Q_{\text{Hyd,real}} = \frac{364 \frac{\text{cm}^3}{30\text{s}} * 1,61 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{2,07 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 283,1 \frac{\text{cm}^3}{30\text{s}} \quad (8b)$$

Zum Vergleich: Herstellerangabe $Q_{\text{Hyd}} = 293 \text{ cm}^3/30 \text{ s} (\pm 10 \text{ cm}^3/30 \text{ s})$

Ähnlich wie mit der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten genauen Berechnung eines theoretischen Kraftstoffverbrauchs konnte auch mittels der vereinfachten Ersatzrechnung ein ausreichend genaues Ergebnis erzielt werden.

Dem Verfahren liegen jedoch einige stark vereinfachende Annahmen zu Grunde, weshalb ein empirisch ermittelter Korrekturfaktor in die Berechnung mit einfließen musste.

7.4.2 Einfluss der Einspritzstrahlform bzw. Güte der Zerstäubung

Während der hydraulische Durchfluss einer Einspritzdüse sowohl aus hydraulischen Kenngrößen als auch aus den Einspritzvorgang beschreibenden Kenngrößen ermittelt werden kann, lässt sich die Güte der Zerstäubung bei laufendem Motor nur unter zusätzlicher Berücksichtigung des Verbrennungsverhaltens beschreiben. Im Unterschied zum hydraulischen Durchfluss existiert für die Bestimmung der Güte der Zerstäubung kein allgemein gültiges Verfahren. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein eigener Ansatz definiert.

Idealerweise ist die zur Beurteilung herangezogene Größe unabhängig vom hydraulischen Durchfluss der Einspritzdüse, so dass Unsicherheiten bei der Bestimmung desselben keinen Einfluss auf die Beurteilung der Güte der Zerstäubung haben.

Basis der nachfolgenden Methoden ist der Ansatz, dass sich die Güte der Kraftstoffzerstäubung anhand des Zündverzugs und der Brenngeschwindigkeit beurteilen lässt. Dabei wird die Zeit zwischen dem Einspritzbeginn und dem Erreichen eines definierten Umsatzpunktes der Verbrennung betrachtet. Diese Größe ist definiert als

$$\text{Verbrennungsverzug} = \varphi_{\text{Umsatzpunkt der Verbrennung, X \%}} - \varphi_{\text{Einspritzbeginn, 10 \%}} \quad (18)$$

mit $\varphi_{\text{Umsatzpunkt der Verbrennung, X \%}}$ Kurbelwinkel des X %-Umsatzpunktes der Verbrennung;
gewählt wurden die Punkte $\varphi_{5 \%}$, $\varphi_{10 \%}$, $\varphi_{50 \%}$, $\varphi_{90 \%}$

$\varphi_{\text{Einspritzbeginn, 10 \%}}$ Kurbelwinkel bei 10 % Nadelöffnung

Da zur Erfassung der Änderung der Güte der Zerstäubung die relative Änderung des Verbrennungsverzugs ausreichend ist, können bei der Druckverlaufsanalyse die Wandwärmeverluste vernachlässigt werden. Die nachfolgenden Berechnungen basieren daher auf dem Heizverlauf.

Abbildung 101 zeigt den Verbrennungsverzug für zwei neue Einspritzdüsen mit gleichem Spritzbild aber unterschiedlichen hydraulischen Durchflüssen.

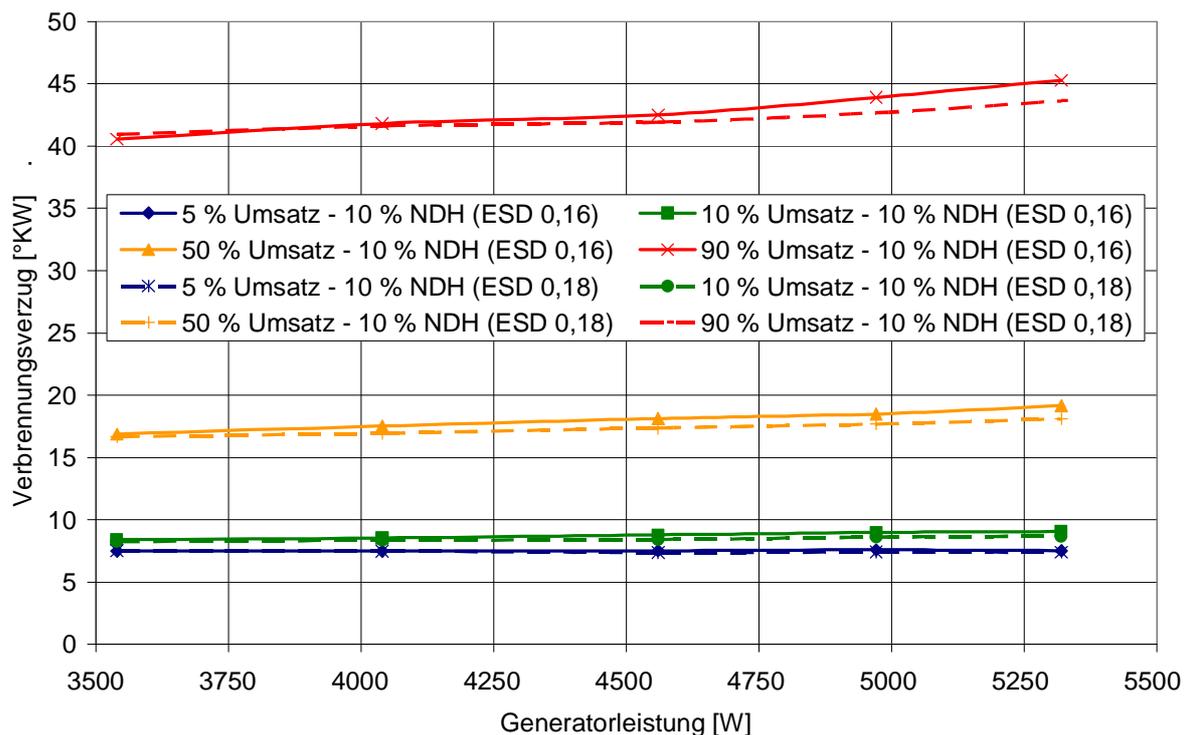


Abbildung 101: Einfluss von hydraulischem Durchfluss und Leistung auf den Verbrennungsverzögerung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele)

Bei Betrachtung des 5 %- und des 10 %-Umsatzpunktes ist praktisch kein Einfluss des hydraulischen Durchflusses erkennbar.

Die vom hydraulischen Durchfluss abhängige Einspritzrate sowie die längere Brenndauer bei hohen Leistungen sind anhand des mittels des 50 %-Umsatzpunktes berechneten Verbrennungsverzögerung zu beobachten.

Bei hohen Leistungen (großen Einspritzmengen) ist bei der Betrachtung des 90 %-Umsatzpunktes ebenfalls ein Unterschied zu erkennen, der hauptsächlich aus der geringeren Einspritzrate der Einspritzdüse mit kleinerem hydraulischem Durchfluss resultiert.

7.5 Vergleich der Methoden zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung

Die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Methoden zur Online-Erkennung werden abschließend in einem Prüflauf über ca. 60 Betriebsstunden mit RÖK 5 miteinander verglichen. In Abbildung 102 sind folgende Größen dargestellt:

- spezifische Abgastemperatur ($T_{\text{Abgas_spez}}$)
- Abgasgegendruck (p_{Abgas})
- Füllungsgrad der Einspritzpumpe (α)
- spezifischer Kraftstoffverbrauch (b_e)
- Maximaldruck im Zylinder ($p_{\text{max,Zylinder}}$)
- Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks (SD_{pmi})
- Hydraulischer Durchfluss der Einspritzdüse (Q_{Hyd})
- Verbrennungsverzug (VBVZ), Basis 10 %-Umsatzpunkt

Aufgrund eines Defekts der Messdatenerfassung liegen zwischen 44 und 51 Betriebsstunden keine Messdaten vor. Weiterhin gab es 3 Unterbrechungen in den Aufzeichnungen des Indiziersystems: Während Betriebsstunde 2, von Betriebsstunde 12 bis 14 sowie von Betriebsstunde 18 bis Betriebsstunde 28.

Die Größen spezifische Abgastemperatur, spezifischer Kraftstoffverbrauch, Füllungsgrad der Einspritzpumpe und Abgasgegendruck steigen über die gesamte Laufzeit nahezu kontinuierlich an. Einzelne sprunghafte Ausschläge der Signale nach oben oder unten kennzeichnen Beginn bzw. Ende einer DPF-Regenerationsphase, eine kurze Unterbrechung des BHKW-Laufs (intervallmäßige Sicherheitsabschaltung) oder durch Kalibrierung der Abgasmessanlage bedingte Umschaltvorgänge im Abgasstrang.

Trotz des nahezu kontinuierlich zunehmenden Abgasgegendrucks zeigt der Maximaldruck im Zylinder zwischen Betriebsstunde 8 und 18 einen anderen Verlauf als zwischen Betriebsstunde 28 und 38. Wie in Kapitel 7.2.3 beschrieben, ist dies ein Zeichen für stark unterschiedliche Ablagerungsbildungsvorgänge im Brennraum in den beiden genannten Betriebsphasen.

Anhand der Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks (berechnet jeweils über 20 Arbeitsspiele) lässt sich erkennen, dass die Laufunruhe über die Dauer des Prüflaufs stetig zugenommen hat. Sowohl der Mittelwert als auch die Streubreite des Signals sind hierfür ein Indiz.

Die Online-Berechnung des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse zeigt nach einem kurzen Einlaufvorgang während der ersten zwei Betriebsstunden einen starken Abfall zwischen Betriebsstunde 2 und 18. Anschließend verharrt der Wert auf dem Niveau von $270 \pm 5 \text{ cm}^3/30 \text{ s}$. Dies deutet darauf hin, dass eine Belagsbildung in den Spritzlöchern hauptsächlich im ersten Drittel des Prüflaufs erfolgt.

Der die Güte der Zerstäubung beschreibende Verbrennungsverzug steigt dagegen über die gesamte Dauer des Prüflaufs nahezu kontinuierlich an (d.h. die Zerstäubung wird schlechter).

Eine detailliertere Betrachtung der Ereignisse zwischen den Betriebsstunden 28 und 38 zeigt Abbildung 103.

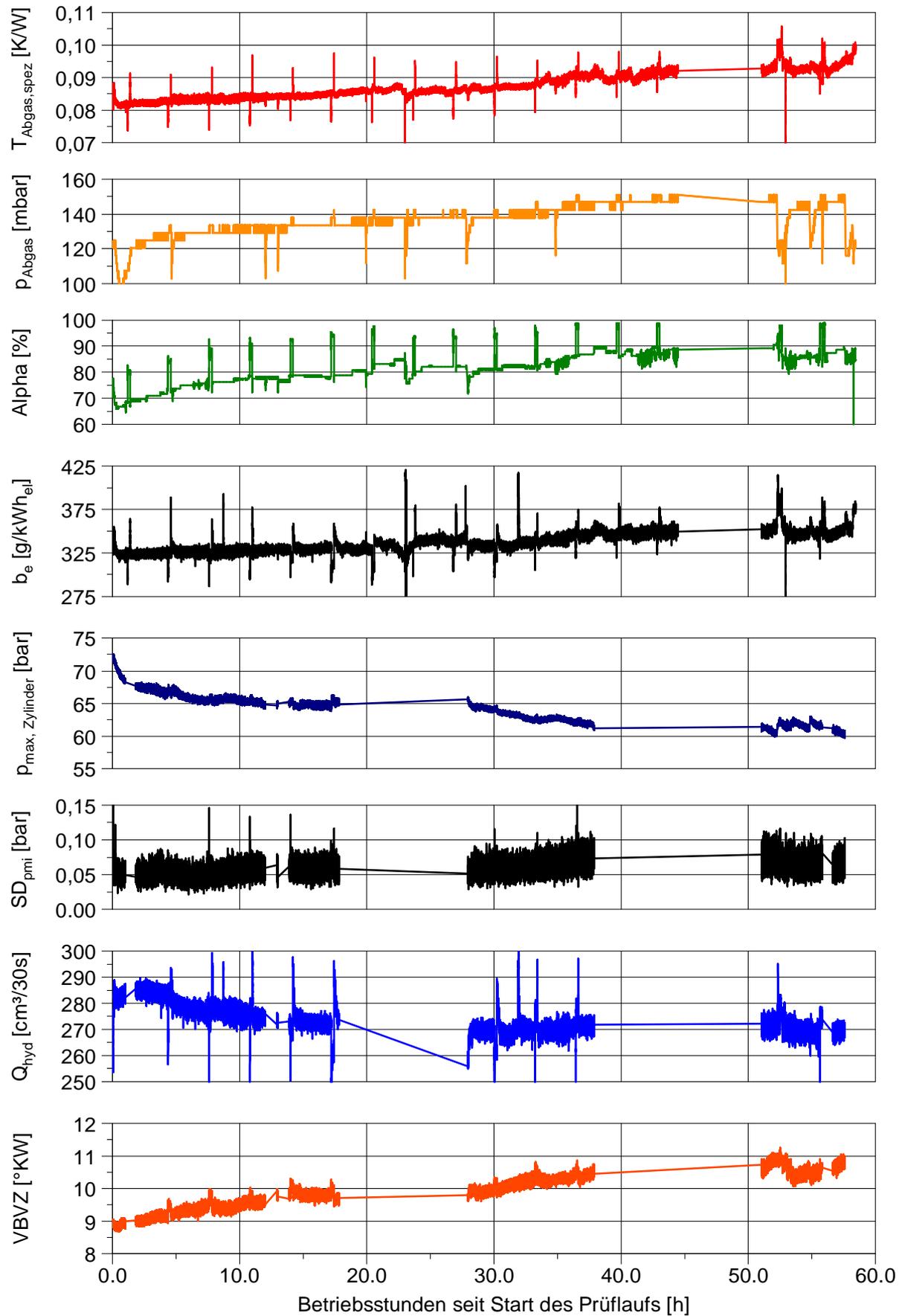


Abbildung 102: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung

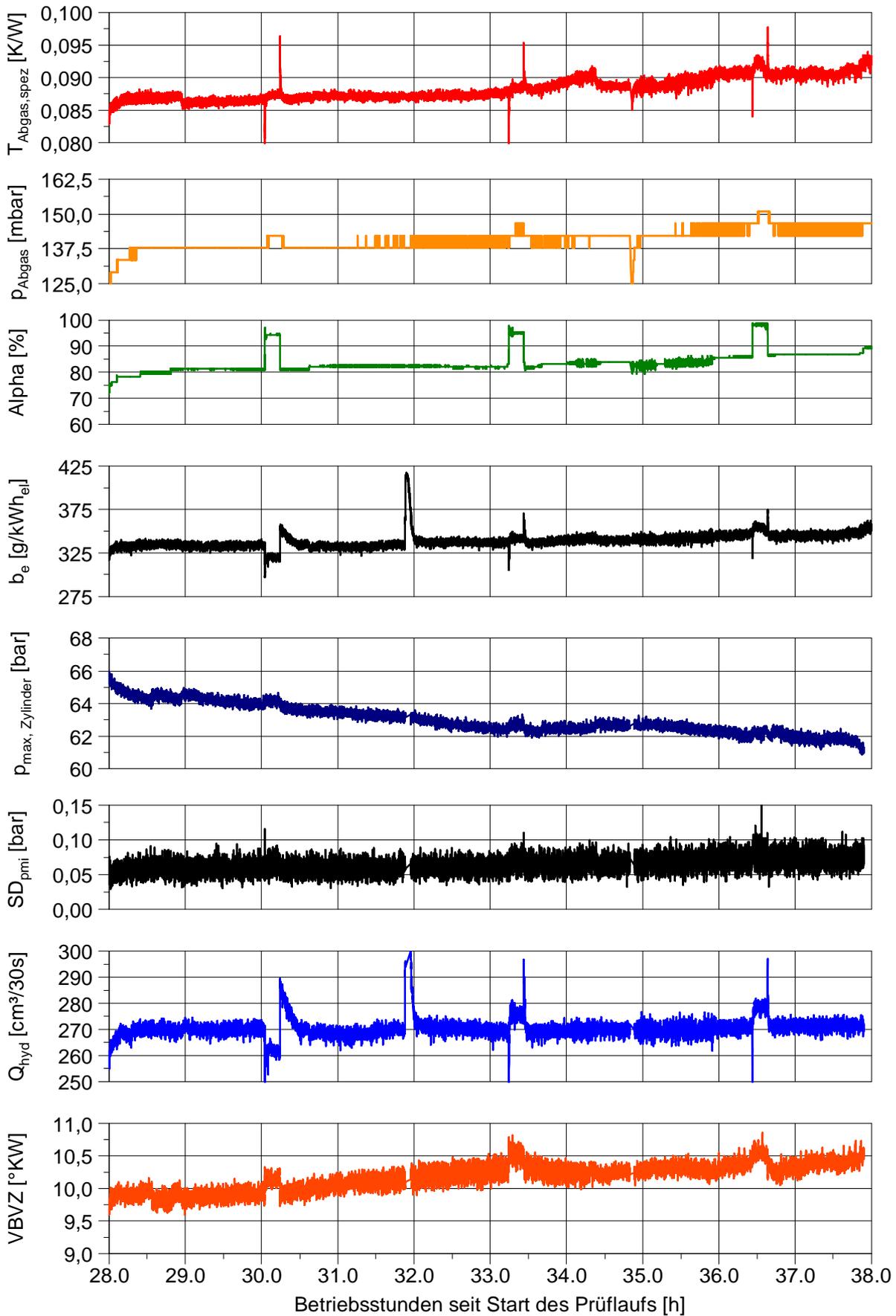


Abbildung 103: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung (Ausschnitt 1)

Kurz vor Betriebsstunde 32 wurde der interne Kraftstoffkreislauf des BHKW entlüftet, wodurch die Berechnung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse in dieser Zeit beeinflusst wurde.

Eine sprunghafte Änderung der spezifischen Abgastemperatur erfolgte ungefähr zu den Zeitpunkten 29 und 34,4 Betriebsstunden. In beiden Fällen konnte gleichzeitig ein leichter Anstieg des Maximaldrucks im Zylinder sowie im ersten Fall eine – wenn auch nur kurzzeitige – Verringerung des Verbrennungsverzugs beobachtet werden. Der spezifische Kraftstoffverbrauch wurde im zweiten Fall positiv beeinflusst. In beiden Fällen kann von einem Abplatzvorgang an der Einspritzdüse ausgegangen werden, welcher jedoch keine messbaren Auswirkungen auf den hydraulischen Durchfluss der Einspritzdüse hatte.

Ein weiterer Abplatzvorgang hat bei 28,5 Betriebsstunden stattgefunden. Hier sind wiederum eine Verkürzung des Verbrennungsverzugs sowie ein Anstieg des Maximaldrucks im Zylinder erkennbar.

Die Ereignisse von Betriebsstunde 51 bis 58 sind in Abbildung 104 im Detail dargestellt. Sowohl der Verlauf des Maximaldrucks im Zylinder als auch des Verbrennungsverzugs deuten auf mehrmals hintereinander aufgetretene Abplatzvorgänge an der Einspritzdüse hin. Diese sind teilweise auch im Verlauf des hydraulischen Durchflusses zu erkennen.

Unklar erscheint zunächst das Betriebsverhalten zwischen Betriebsstunde 52,2 und 53. Aufschluss ergibt sich durch die in Abbildung 105 dargestellte detaillierte Betrachtung des Zeitraums von Betriebsstunde 51 bis 54. Abgebildet sind neben ausgewählten Kenngrößen aus Abbildung 104 die der Berechnung spezifischer Größen zu Grunde liegenden Signalverläufe der Abgastemperatur und der Generatorleistung, die Verläufe der CO-, THC- und NO_x-Emissionen, sowie die Gesamtanzahl der Startvorgänge.

Daraus ergibt sich, dass zum Zeitpunkt 52,2 h eine automatische Abschaltung des BHKW erfolgt ist, da die Abgastemperatur aufgrund vorangegangener Ablagerungsbildung den Grenzwert von 520 °C überschritten hatte. In den folgenden 15 Minuten erfolgten mehrere Startversuche, in deren Folge jedoch wiederholt die Abgastemperaturgrenze überschritten wurde. Ein Weiterlauf des BHKW wurde nur dadurch ermöglicht, dass nach dem 5. Startversuch zufällig der Zeitpunkt zur zyklischen DPF-Regeneration erreicht war, und damit die Grenztemperatur vorübergehend auf 590 °C angehoben wurde.

Mit dem Zeitpunkt der ersten Abschaltung sinkt der Abgasgegendruck auf ein um ca. 25 mbar niedrigeres Niveau. Dies deutet darauf hin, dass nach der Abschaltung des Motors durch den damit eintretenden Sauerstoffüberschuss noch vor der DPF-Regenerationsphase Ruß-Oxidationsvorgänge im Abgassystem eingeleitet wurden. Nach Wiederaufnahme des Normalbetriebs (ab ca. 52,9 Betriebsstunden) erreichte der Abgasgegendruck innerhalb von ca. 20 Minuten nahezu wieder seinen Ursprungswert vor der ersten Abschaltung.

Der von 52,2 bis 52,9 Betriebsstunden erhöhte Maximaldruck im Zylinder resultiert aus dem in diesem Zeitraum ebenfalls erhöhten indizierten Mitteldruck bis zum Erreichen des Stationärzustands nach einem Startvorgang. Die in diesem Zeitraum erhöhten Emissionswerte sind ebenfalls auf die einzelnen Startversuche zurück zu führen.

Zum Zeitpunkt 53,2 sowie 53,35 Betriebsstunden ereignen sich wieder typische Abplatzvorgänge von Einspritzdüsenablagerungen. Diese können jeweils in mehreren Signalverläufen beobachtet werden.

Weitere Abschaltungen aufgrund des Überschreitens der Abgasgrenztemperatur haben zu den Betriebsstunden 54,7 und 57,6 stattgefunden.

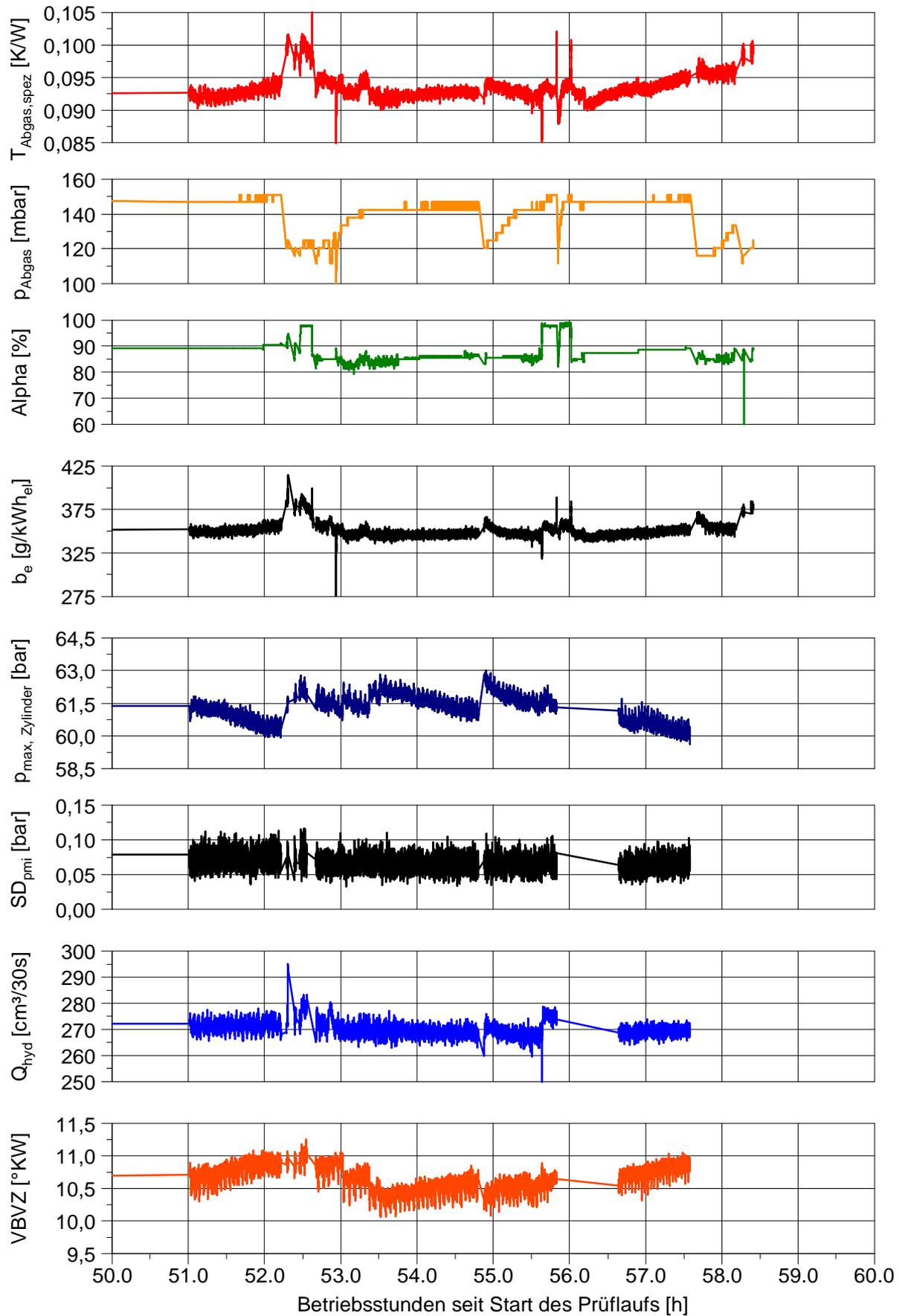


Abbildung 104: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung (Ausschnitt 2)

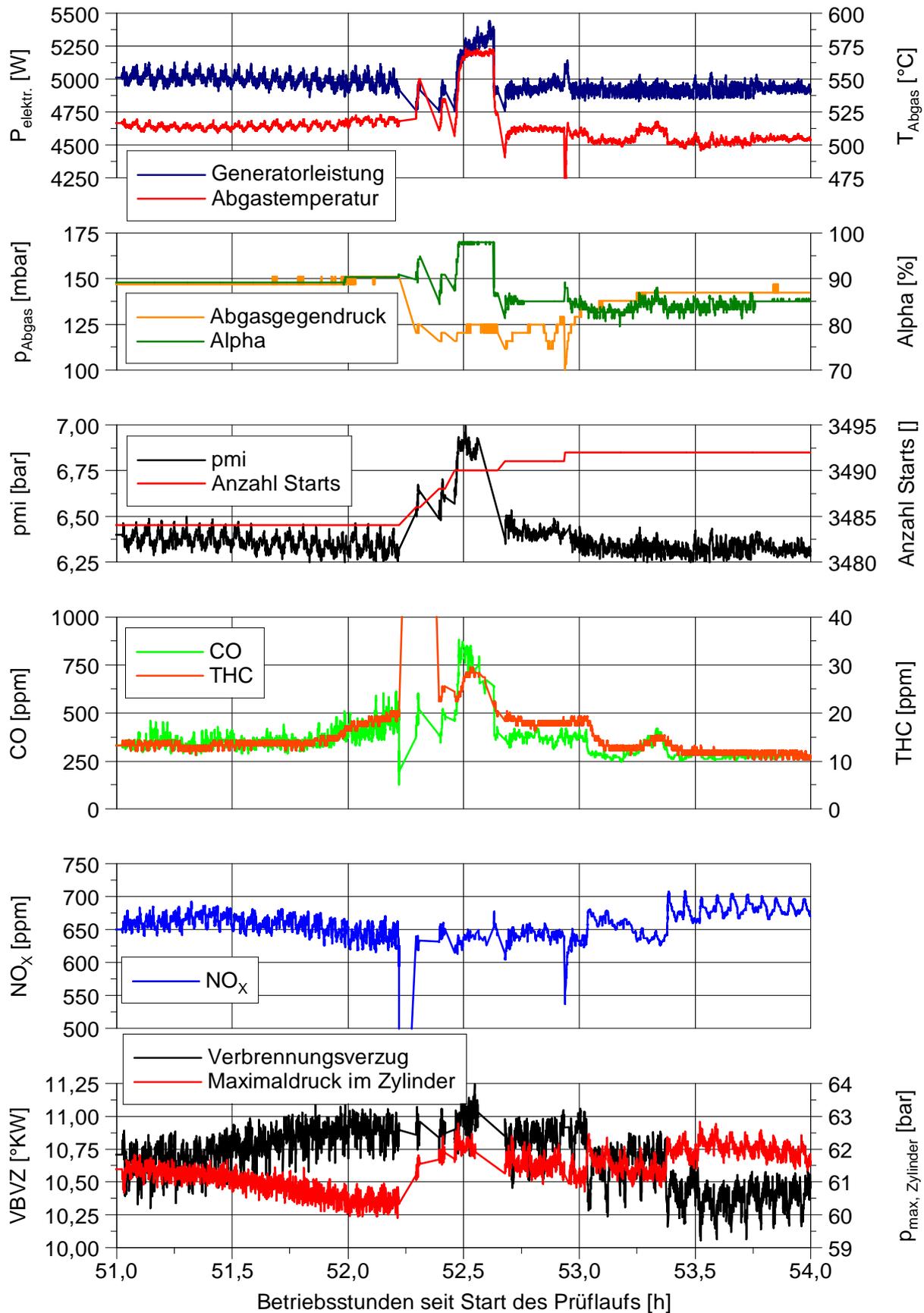


Abbildung 105: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung (Ausschnitt 3)

Zusammengefasst lassen sich die einzelnen Methoden zur Online-Erkennung wie folgt bewerten:

spezifische Abgastemperatur

Sofern auf eine Differenzierung der Ablagerungsbildung nach ihrem Ort verzichtet werden kann, eignet sich die spezifische Abgastemperatur sehr gut zur Online-Erkennung. Insbesondere bietet sie den Vorteil der robusten und dennoch preisgünstigen Messtechnik, wodurch diese Messgröße für Serienanwendungen besonders geeignet ist. Wird als Bezugsgröße die abgegebene Motorleistung verwendet, darf die Messgröße nur im stationären Betriebszustand ausgewertet werden. Idealerweise sollte daher alternativ der indizierte Mitteldruck verwendet werden, dieser erfordert jedoch einen deutlichen messtechnischen Mehraufwand.

spezifischer Kraftstoffverbrauch

Analog zur spezifischen Abgastemperatur bietet auch der spezifische Kraftstoffverbrauch keine Möglichkeit der Differenzierung der Ablagerungsbildung, ebenfalls gelten die gleichen Einschränkungen bezüglich des Betriebszustands. Weiterhin ist die für ein entsprechend hoch aufgelöstes Signal erforderliche Messtechnik teuer und daher nicht für einen Serieneinsatz geeignet.

Füllungsgrad der Einspritzpumpe

Auch der Füllungsgrad der Einspritzpumpe ermöglicht keine Differenzierung der Ablagerungsbildung, ist jedoch im Unterschied zum spezifischen Kraftstoffverbrauch mit preiswerter Messtechnik zu bestimmen. Berücksichtigt werden müssen – neben dem Betriebspunkt des Motors – jedoch Quereinflüsse von Kraftstofftemperatur und -druck.

Abgasgegendruck

Die Messgröße Abgasgegendruck zeigt ausschließlich Änderungen im Abgassystem an. Wie in Kapitel 6.1.3.1 gezeigt, ist der Gegendruck als alleinige Größe zur Beschreibung des Ablagerungszustands nicht ausreichend.

Maximaldruck im Zylinder

Der Maximaldruck im Zylinder reagiert sehr direkt auf Änderungen von Brennraumablagerungen, insbesondere Ablagerungen an der Einspritzdüse. Es besteht jedoch naturgemäß eine starke Querempfindlichkeit zum indizierten Mitteldruck, weshalb auch hier nur stationäre Betriebszustände betrachtet werden können.

Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks

Ähnlich dem spezifischen Kraftstoffverbrauch eignet sich die Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks nur zur Erfassung von Langzeittrends, da der generelle Signalverlauf von einem starken Rauschen überlagert ist.

Hydraulischer Durchfluss der Einspritzdüse

Die Auswertung eines realen Prüflaufs zeigte, dass die Online-Berechnung des hydraulischen Durchflusses der Einspritzdüse nach dem vereinfachten Verfahren (Kapitel 7.4.1.2) noch eine deutliche Querempfindlichkeit gegenüber Änderungen der Generatorleistung um ca. 10 % aufweist. Im Stationärbetrieb ist die Messgröße dagegen bereits sehr aussagekräftig.

Verbrennungsverzug

Ähnlich dem hydraulischen Durchfluss der Einspritzdüse ist auch beim Verbrennungsverzug die Querempfindlichkeit gegenüber größeren Leistungssprüngen noch deutlich zu erkennen. Im Stationärbetrieb sind Änderungen der Zerstäubungsgüte der Einspritzdüse dagegen sehr klar erkennbar.

8 Einordnung der Ergebnisse und Diskussion der Thesen

Wie in der Problemstellung beschrieben, erscheinen die in der Literatur dokumentierten Ergebnisse von Untersuchungen zur Ablagerungsbildung und deren Auswirkungen auf das Betriebsverhalten eines Verbrennungsmotors widersprüchlich. Als Grund dafür können überwiegend nicht ausreichend dokumentierte Randbedingungen der Untersuchungen angenommen werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zur Erfassung und Quantifizierung von Ablagerungen sowie deren Einfluss auf das Betriebsverhalten gehen über den bislang bekannten Stand des Wissens hinaus und erfordern teilweise eine Neubewertung bereits durchgeführter Untersuchungen. Die nachfolgende Diskussion der Thesen zu Bildung, Auswirkungen und Erkennung von Ablagerungen liefert die dafür notwendige Grundlage.

Der Diskussion der Thesen vorangestellt erfolgt eine allgemeine Bewertung der Qualität und der Aussagekraft der Untersuchungsergebnisse. Dies ist insbesondere hinsichtlich der Reproduzier- und Wiederholbarkeit, der Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle und der Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen von Bedeutung.

8.1 Qualität und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Anstelle von Wiederholungen aller durchgeführten Untersuchungen wurden die jeweils vier Langzeitversuche zum Einfluss der Kraftstoffqualität unter vergleichbaren Randbedingungen auf zwei baugleichen BHKW durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die durch die Kraftstoffzusammensetzung vorgegebene Grundsteigung des Ablagerungsaufbaus von vorwiegend zufällig auftretenden Sprungereignissen überlagert wird. Diese führen dazu, dass nur durch Wahl von geeigneten Verfahren zur Messung und Auswertung verlässliche und robuste Aussagen erzielbar sind. Die dafür gewählte kontinuierliche Datenaufzeichnung als wesentlicher Bestandteil zur Erfassung des Ablagerungsauf- und -abbaus sowie die ausgearbeiteten Verfahren zur Auswertung sind auf Untersuchungen zur Ablagerungsbildung mit anderen Motoren übertragbar.

Im Rahmen der Untersuchungen traten bei einzelnen Prüfläufen sporadische Leistungsschwankungen im Bereich von ± 50 W mit einer Periodendauer von ca. 90 bis 150 s auf. Die Ursache für diese sehr niederfrequenten Schwankungen konnte nicht eindeutig geklärt werden. Möglich sind sowohl Effekte, die aus der Ventildrehung insbesondere eines Einlassventils mit eventuell teilweise belegter Ventiltulpe rühren, als auch Vibrationen oder Resonanzeffekte am Stellmotor der Leistungsnachführung.

In den Diagrammen mit der Darstellung einer Messgröße über die Zeit sind diese Effekte teilweise zu beobachten, signifikante Auswirkungen auf die zur Auswertung herangezogenen Messdaten können jedoch insbesondere aufgrund der niedrigen Frequenz der Schwankungen ausgeschlossen werden.

Eine weitere Unsicherheit betrifft die Messung der Abgastemperatur. Insbesondere beim Betrieb mit stark ablagerungsbildendem Kraftstoff können sich isolierende Beläge auf dem Abgastemperatursensor bilden, die zu einer Reduzierung der gemessenen Temperatur führen. Der zeitliche Verlauf dieses Effektes ist nicht genau bekannt, theoretisch ist auch ein plötzlicher Abbruch derartiger Beläge denkbar. Dieser Effekt konnte bei den Auswertungen nicht festgestellt werden, da Änderungen der Abgastemperatur grundsätzlich durch gleichzeitige Änderungen von anderen Messgrößen begleitet wurden. Dennoch kann insbesondere eine schleichende Beeinflussung der Abgastemperaturmessung nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Trotz der genannten Einschränkungen ermöglichen die gewählten Verfahren zur Datenerfassung und -auswertung belastbare Aussagen zur Beschreibung der Ablagerungsbildung sowie deren Auswirkungen auf den motorischen Betrieb.

8.2 Bewertung der Thesen zur Bildung von Ablagerungen

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche und daraus abgeleiteten offenen Fragestellungen wurden zu Beginn der Arbeit Thesen zur Ablagerungsbildung beim Betrieb eines Verbrennungsmotors mit Rapsölkraftstoffen formuliert (siehe Kapitel 4). Die dort vermuteten Wirkungszusammenhänge werden in den nachfolgenden Unterkapiteln anhand der exemplarisch an den beiden BHKW gewonnenen Erkenntnissen diskutiert.

Abhängig vom jeweiligen Ort der Ablagerungsbildung können die Thesen in zwei Gruppen zusammengefasst werden:

- a) Einflüsse, welche eine eindeutige Langzeittendenz zeigen und grundsätzlich prognostizierbar sind.
- b) Einflüsse, welche keine eindeutige Tendenz zeigen und nicht mit ausreichender Sicherheit prognostiziert werden können.

Diese Unterscheidung muss jedoch bauteilindividuell durchgeführt werden, da z. B. der Temperatureinfluss an den Ventilen als eindeutig und prognostizierbar gilt, an der Einspritzdüse dagegen nach heutigem Wissensstand nicht.

In der Praxis bedeutet dies, dass die Einflüsse der Gruppe a) die Grundrichtung für den zeitlichen Verlauf der Ablagerungsbildung bzw. einer die Ablagerungsbildung beschreibenden Messgröße vorgeben. Die Einflüsse der Gruppe b) zeigen sich als – mehr oder weniger stark ausgeprägtes – überlagertes „Rauschen“.

Im Gegensatz zu den Einflüssen mit eindeutigem Trendverhalten sind solche mit nicht eindeutigem Trendverhalten ausschließlich im Brennraum eines Motors (und dort hauptsächlich an der Einspritzdüse) anzutreffen. Dies betrifft die Thesen zum Einfluss des Betriebsprofils, des Temperaturniveaus sowie zur Existenz von Sättigungs- und Reinigungseffekten.

Die dahinter stehenden Vorgänge

- (teil-)reversibler Abbau von Ablagerungen und
- Änderung der Geschwindigkeit des Aufbaus von Ablagerungen

sind hochdynamisch, weshalb zu ihrer Erfassung und Auswertung teilweise aufwändige Messtechnik erforderlich ist. Ein erster Ansatz konnte durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Messdaten im 1-Hz-Intervall gemacht werden. Zur vollständigen Klärung des Trendverhaltens dieser Vorgänge sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Die indirekte Beurteilung der Ablagerungsbildung anhand motorischer Messgrößen basiert auf der Annahme, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Ausprägung (Masse, Menge) der Ablagerung und der daraus resultierenden Änderung des motorischen Verhaltens besteht.

8.2.1 Einfluss der Betriebsstoffe Kraftstoff und Schmieröl

Unter den verschiedenen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einflussfaktoren auf die Ablagerungsbildung in Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem eines Verbrennungsmotors kommt der Zusammensetzung der Betriebsstoffe Kraftstoff und Schmierstoff die mit Abstand größte Bedeutung zu. Die in Kapitel 6.1 vorgestellten Ergebnisse der Untersuchungen mit unterschiedlichen Kraftstoffzusammensetzungen entsprechen dabei prinzipiell den Ergebnissen

anderer Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Rapsölkraftstoffe auf die Ablagerungsbildung.

Zwischen der aus den Elementgehalten des Kraftstoffs, dem Kraftstoffverbrauch und der Betriebszeit resultierenden Menge an eingetragenen ablagerungsbildenden Substanzen und der Ablagerungsmasse besteht ein direkter Zusammenhang, welcher insbesondere im Partikelfilter annähernd linear verläuft.

Im Brennraum – und dort besonders an der Einspritzdüse – ist ebenfalls ein eindeutiger Unterschied zwischen dem Betrieb mit Kraftstoffen mit hohem und niedrigem Gehalt der Elemente Phosphor, Calcium und Magnesium festzustellen. Aufgrund von dort ablaufenden Sättigungs- und Reinigungsprozessen fallen die Unterschiede zwischen den untersuchten Kraftstoffen mit unterschiedlicher Konzentration dieser Elemente jedoch deutlich geringer als im Partikelfilter aus.

Abbildung 106 und Abbildung 107 zeigen anhand zweier beim Düsenhersteller exemplarisch durchgeführter EDX-Analysen die Zusammensetzung der auf der Einspritzdüsenkuppe gebildeten Beläge beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zum Betrieb mit mineralischem Diesekraftstoff. Während letztere überwiegend aus Kohlenstoff und atomarem Sauerstoff bestehen, sind bei den Ablagerungen aus Rapsölkraftstoff Phosphor und Calcium deutlich zu erkennen.

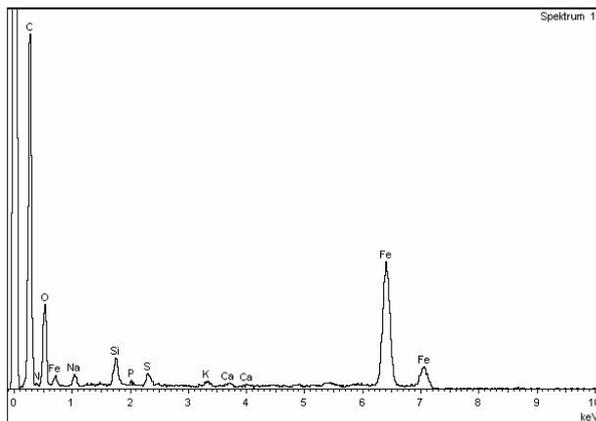


Abbildung 106: EDX-Spektrum der Düsenkuppenbeläge (Diesekraftstoff)

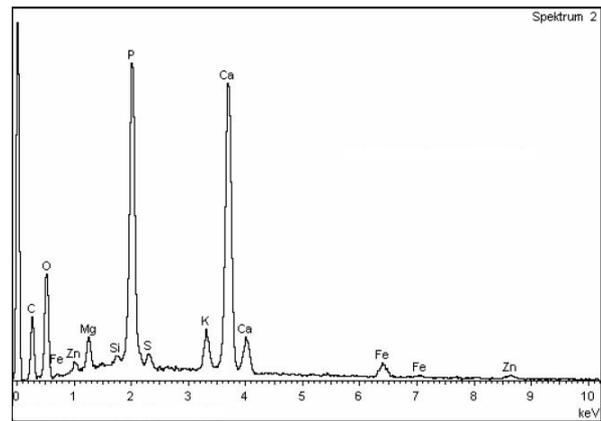


Abbildung 107: EDX-Spektrum der Düsenkuppenbeläge (Rapsölkraftstoff)

Sowohl im Brennraum als auch im Abgasnachbehandlungssystem beginnen die Ablagerungsvorgänge bereits bei Elementkonzentrationen von wenigen mg/kg. Der wesentliche Unterschied zu Kraftstoffen mit deutlich höheren Elementkonzentrationen liegt hauptsächlich im zeitlichen Verlauf der Belagsbildung. Folglich müssen bei alleiniger Betrachtung der Kraftstoffqualität die Grenzwerte für die untersuchten Elemente Phosphor, Calcium und Magnesium nahe Null liegen. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Ergebnissen früherer Untersuchungen, in denen weitaus höhere Elementkonzentrationen als akzeptabel eingestuft wurden.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit war der Einfluss des Schmierölverbrauchs nicht relevant, da ein sehr aschearmes Schmieröl verwendet wurde (Sulfataschegehalt < 0,85 Masse-%) und der Schmierölverbrauch der beiden BHKW sehr gering war (< 0,4 g/kWh_{el}).

Es kann davon ausgegangen werden, dass unter anderen Randbedingungen (anderes Schmieröl, höherer Schmierölverbrauch) der Einfluss des Schmieröls den Gesetzmäßigkeiten der Kraftstoffeigenschaften folgt.

8.2.2 Einfluss des Temperaturniveaus

Wie bereits in der einleitenden Literaturrecherche zu dieser Arbeit erläutert, sind die Literaturaussagen zum Zusammenhang zwischen der Bauteiltemperatur und der Ablagerungsbildungstendenz uneinheitlich. Eine differenziertere Betrachtung hinsichtlich verschiedener möglicher Bildungsmechanismen und Arten von Ablagerungen sowie eine nach Bauteilen getrennte Betrachtung sind notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich die Untersuchung des Temperatureinflusses auf aschehaltige Ablagerungen. Der Partikelfilter wird bei der Überprüfung der Temperaturthese nicht berücksichtigt, da dort aus heutiger Sicht keine Bildungsmechanismen im eigentlichen Sinne ablaufen, sondern ein rein mechanisches Sammeln von Ablagerungen stattfindet (siehe auch Kapitel 6.1.3.1).

Nachfolgend erfolgt die Diskussion der Temperaturthese daher anhand der Bauteile Ventile, Kolben, Brennraumdecke und Einspritzdüse.

Ventile

Die Ventile eines Verbrennungsmotors leiten die bei der Verbrennung entstehende Wärme über den Ventilschaft sowie – in geschlossenem Zustand – über den Ventilsitz in den Zylinderkopf ab. Beispiele für typische Temperaturverteilungen am Auslassventil finden sich in Kapitel 2.2.6.

In der Praxis können schlecht tragende Ventile sowie Ablagerungen im Sitzbereich den Wärmeübergang über den Ventilsitz beeinträchtigen. Aus diesem Grund wurden die neuen Ventile vor jedem Prüflauf in den Ventilsitzring eingeschliffen, um eine vergleichbare Wärmeabfuhr zu ermöglichen. Die Befundung der Ventile und Ventilsitzringe nach den Prüfläufen ergab weiterhin, dass an diesen Stellen während der Prüfläufe keine nennenswerte Ablagerungsbildung erfolgt ist.

Abbildung 108 und Abbildung 109 zeigen beispielhaft den Ventilteller von Einlass- und Auslassventil aus BHKW 1 nach dem Betrieb mit RÖK 4. Die Ansichten zeigen sowohl den Einfluss des unterschiedlichen Temperaturniveaus zwischen den beiden Ventilen als auch den Ablagerungsaufbau vom heißen Zentrum des Ventiltellers aus. Weitere Ventilansichten sind im Kapitel 6.1.3.3 dargestellt.



Abbildung 108: Einlassventil (BHKW 1, RÖK 4)

Abbildung 109: Auslassventil (BHKW 1, RÖK 4)

Der Zusammenhang zwischen der Bauteiltemperatur und der Ablagerungsbildung ist bei Einlass- und Auslassventil eindeutig gegeben. Auf der – mit Ausnahme der Oberflächentemperatur – homogenen Ventiltellerfläche sind keine weiteren Effekte zu beobachten. Der zeitliche Ablauf

der Aschebelegung während des Prüflaufs bestätigt zudem die Temperaturthese. Auf den Endoskopbildern (Tabelle 20, Kapitel 6.1.3.3) ist deutlich zu sehen, wie die Ablagerungen von der Mitte des Ventiltellers nach außen wachsen.

Kolben

Zur Temperaturverteilung an DI-Dieselmotorkolben existiert eine Reihe von berechneten Modellen. Diese sind in Kapitel 2.2.3.1 dargestellt und dienen als Grundlage für die Verifizierung der Temperaturthese am Kolben. In allen Beispielen ist die Temperatur am Übergang zur Kolbenmulde am höchsten. Zu berücksichtigen ist, dass diese exemplarischen Ergebnisse nur unter Berücksichtigung der Kolbenbauart und der Randbedingungen der Kolbenkühlung auf andere Motoren übertragbar sind.

Der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und daraus resultierenden Ablagerungen ist am Kolben weniger eindeutig als am Auslassventil. Trotz des teilweise überlagerten Spritzbilds ist in den stellvertretend in Abbildung 110 und Abbildung 111 dargestellten Kolben eine Konzentration der Ablagerungen in der heißen Zone am Übergang zur Kolbenmulde deutlich erkennbar.



Abbildung 110: Bereiche starker Ablagerungen am Kolben (BHKW 1, RÖK 4)

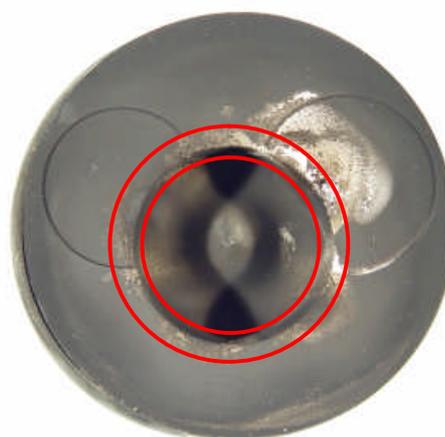


Abbildung 111: Bereiche starker Ablagerungen am Kolben (BHKW 2, RÖK 4)

Brennraumdecke

Zur Verifizierung der Temperaturthese an der Brennraumdecke erfolgt zunächst eine theoretische Abschätzung der Temperaturgradienten und anschließend die Überprüfung anhand der Befundungsergebnisse der Bauteile aus den Langzeit-Prüfläufen.

Abbildung 112 und Abbildung 113 zeigen die Lage der Kühlkanäle hinter der Brennraumdecke in zwei verschiedenen Tiefen (gemessen ab Oberkante Brennraum). In den ausgewählten Tiefen verändern sich die Kühlquerschnitte jeweils signifikant, d.h. bis zu einer Tiefe von 12 mm sind im Bereich des Brennraums keine Kühlkanäle vorhanden. Zwischen 12 mm und 15 mm Tiefe ändert sich der Querschnitt der Kanäle nicht nennenswert.

Aufgrund der Lage der Kühlkanäle wird angenommen, dass die brennraumseitigen Zonen im Bereich der Kühlkanäle „Tiefe 12 mm“ sehr viel kühler und im Bereich der Kühlkanäle „Tiefe 15 mm“ immer noch merklich kühler als die übrigen Flächen sind.

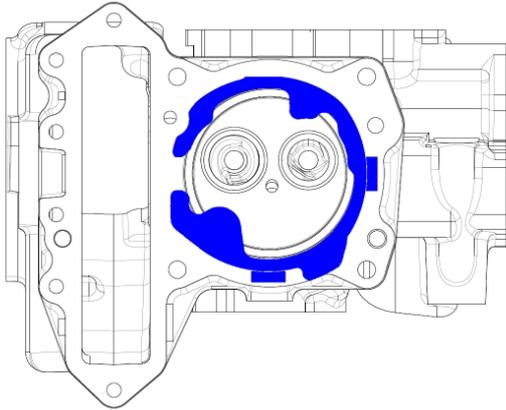


Abbildung 112: Lage der Kühlkanäle in 12 mm Tiefe

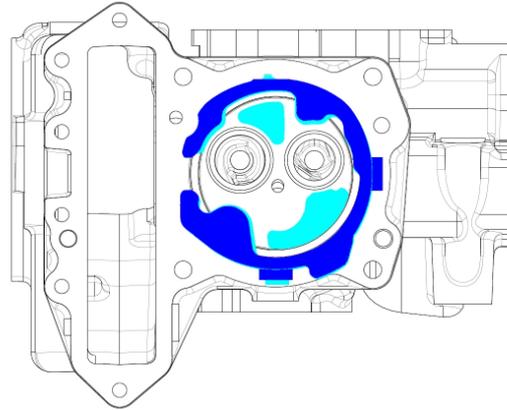


Abbildung 113: Lage der Kühlkanäle in 15 mm Tiefe

In Abbildung 114 und Abbildung 115 ist die Lage der Kühlkanäle in den beiden Ebenen auf die Brennraumdecke projiziert. Gewählt wurden jeweils die Ansichten nach dem Betrieb der Motoren für 500 Betriebsstunden mit RÖK 4, da dort die stärkste Ablagerungsbildung im Rahmen der Langzeitprüfläufe zu verzeichnen war. Zusätzlich zur Lage der Kühlkanäle sind die Bereiche mit starker Aschebelastung gekennzeichnet.

Die Lage der Montagehülsen zur Aufnahme von Zylinderdrucksensoren ist in den Abbildungen gestrichelt dargestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese die Oberflächentemperaturen jedoch nicht nennenswert beeinflussen.

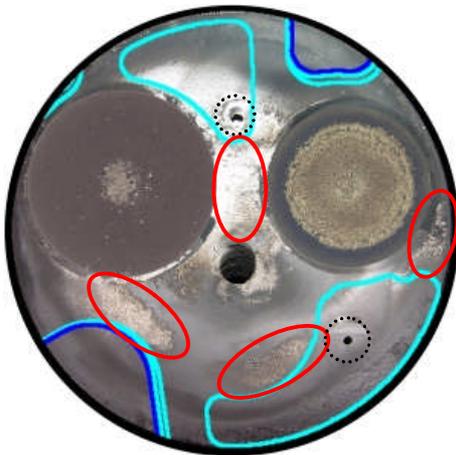


Abbildung 114: Lage der Kühlkanäle und Bereiche starker Ablagerungen (BHKW 1, RÖK 4)

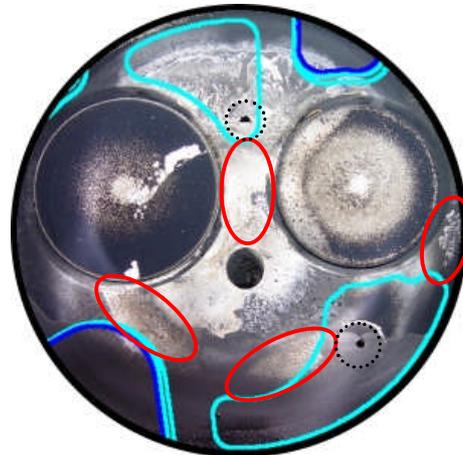


Abbildung 115: Lage der Kühlkanäle und Bereiche starker Ablagerungen (BHKW 2, RÖK 4)

Wie in Kapitel 6.1.3.3 bereits erwähnt, spiegeln die Ablagerungen an der Brennraumdecke teilweise die Lage der Einspritzstrahlen wieder. Dennoch ist die scharfe Abgrenzung der Ablagerungsgebiete zur Lage der Kühlwasserkanäle auffällig.

Insbesondere das Ablagerungsgebiet am rechten Rand in unmittelbarer Nähe des Auslassventils deutet sehr stark auf einen Temperatureinfluss hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass der entsprechende Bereich auf der gegenüberliegenden Seite des Brennraums aufgrund des dort verlaufenden Einlasskanals wesentlich kühler und daher frei von Ascheablagerungen ist.

Genauere Aussagen sind jedoch auch hier nur durch Simulationsrechnung anhand des CAD-Modells des Zylinderkopfs sowie durch Messung der Oberflächentemperaturen im Betrieb (instrumentierte Brennraumdecke) möglich. Dabei sollte sowohl der Effekt von unterschiedlichen Temperaturverläufen aufgrund der Verbrennungsabstimmung als auch der Effekt unterschiedlicher Bauteilkühlung (Änderung der Kühlwassertemperatur, etc.) untersucht werden.

Einspritzdüse

Für die Einspritzdüse liegen keine allgemein gültigen Informationen zur Temperaturverteilung – insbesondere an der Düsenkuppe – vor. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit die dort im Betrieb herrschende Temperatur experimentell ermittelt und mittels konstruktiver Maßnahmen sowie Variation des Betriebspunkts verändert. Die anschließend durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss des Temperaturniveaus an der Düsenkuppe auf die Ablagerungsbildung lassen auch hier einen Zusammenhang vermuten, dieser ist allerdings deutlich schwächer ausgeprägt als an den zuvor diskutierten Bauteilen des Brennraums (siehe Kapitel 6.3.2).

Zu einer differenzierteren Aussage zum Einfluss der Bauteiltemperatur auf das Ablagerungsverhalten an der Einspritzdüse sind daher weitergehende Untersuchungen erforderlich, welche die scheinbar zufälligen Ereignisse an diesem Bauteil genauer beschreiben und somit nähere Erkenntnisse über die dort ablaufenden Ablagerungsvorgänge liefern sollten.

Zusammenfassung

Die Überprüfung der These zur Temperaturabhängigkeit der Ablagerungsbildung liefert ein für die einzelnen Bauteile unterschiedlich ausgeprägtes Bild:

- An den Ventilen kann der Temperatureinfluss als sehr sicher angenommen werden. Hohe Oberflächentemperaturen begünstigen hierbei die Anlagerung von aschehaltigen Ablagerungen.
- Am Kolben gilt der Temperatureinfluss als ziemlich sicher, ein zusätzlicher Einfluss des Spritzbilds der Einspritzdüse ist erkennbar.
- An der Brennraumdecke wird ein Temperatureinfluss vermutet, auch hier ist ein zusätzlicher Einfluss des Spritzbilds erkennbar.
- An der Einspritzdüse wird ebenfalls ein Einfluss der Temperatur vermutet, hier sind jedoch noch viele weitere Einflussfaktoren noch nicht ausreichend bekannt.

Dieser beobachtete Zusammenhang zwischen hoher Oberflächentemperatur und daraus resultierender verstärkter Ablagerungsbildung steht im Widerspruch zu den in der Literatur beschriebenen Transportmechanismen Thermodiffusion und Thermophorese.

8.2.3 Einfluss des Betriebsprofils

Bei den Untersuchungen zum Einfluss des Betriebsprofils auf die Ablagerungsbildung steht die Frage nach den Auswirkungen von wechselnden Temperaturniveaus im Vordergrund. Allgemein gilt bei Verbrennungsmotoren der Dauerlaufbetrieb als eine den Motor nur gering belastende Betriebsweise. Ein Taktbetrieb bzw. ein Betrieb mit stark wechselnden Lasten und dadurch schwankenden Bauteiltemperaturen kann jedoch Vorteile bieten, wenn damit die mechanische Stabilität von Ablagerungen geschwächt werden kann. Somit stehen Untersuchungen zum Einfluss des Betriebsprofils in engem Zusammenhang mit Sättigungs- und Reinigungseffekten.

Die entsprechenden Untersuchungen mit unterschiedlichen Lauf- und Stillstandszeiten zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Betriebsprofil und der Ablagerungsbildung. Grundsätzlich scheint es, als müssen insbesondere beim Start-Stopp-Betrieb die Vor- und Nachteile sorgfältig gegeneinander aufgewogen werden. Während die bei einem Startvorgang erfolgende schnelle Änderung des Temperaturniveaus die mechanische Stabilität von Ablagerungen tendenziell schwächt und damit zum Abbau von Ablagerungen beitragen kann, hat der

beim Abstellen des Motors in der heißen Einspritzdüse verbleibende Restkraftstoff eindeutig negative Auswirkungen (Verkokungsneigung) [73].

Folglich könnte ein nur kurzes Abschalten (Stillstandszeit maximal wenige Minuten) in Verbindung mit ausreichend langen Laufzeiten aus Sicht des Ablagerungsabbaus ein Optimum darstellen. Dazu sind jedoch weitere Untersuchungen und insbesondere eine detaillierte Erfassung der Temperaturverläufe kritischer Bauteile bei einem derartigen Betriebsprofil erforderlich.

Ebenso konnte kein Zusammenhang zwischen den zur zyklischen DPF-Regeneration durchgeführten Phasen erhöhter Motorleistung und einer Änderung des Ablagerungszustands ermittelt werden. Auch hier verspricht eine detaillierte Erfassung der Temperaturverläufe weitere Erkenntnisse.

8.2.4 Einfluss des Sättigungseffekts

Neben einer eventuell durch das Betriebsprofil beeinflussten Verringerung der Geschwindigkeit des Ablagerungsaufbaus wurden auch die Existenz und der Einfluss eines davon unabhängigen Sättigungseffektes untersucht. Im Unterschied zum Reinigungseffekt wird durch den Sättigungseffekt ein Ablagerungsniveau trotz kontinuierlichem Eintrag von ablagerungsfähigen Substanzen zumindest für eine bestimmte Zeit annähernd konstant gehalten. In der Literatur finden sich Sättigungseffekte beispielsweise bei Caprotti et al. [21].

Die Befundung von Einspritzdüsen nach dem Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten lässt einen Sättigungseffekt an der Einspritzdüse vermuten. Trotz stark unterschiedlicher Konzentration an aschebildenden Elementen im Kraftstoff liegen die mittels Projektion ermittelten Beladungsmengen beim Betrieb mit RÖK 2 bis RÖK 4 in einem ähnlichen Bereich. Die Beladungsmengen nach dem Betrieb mit Kraftstoff ohne aschebildende Elemente (RÖK 1) liegen dagegen auf einem deutlich niedrigeren Niveau.

Ein ähnliches Bild liefert auch die Auswertung der Betriebsdaten dieser Prüfläufe. Obwohl hier zusätzlich eine kraftstoffabhängige lineare Beladung des Partikelfilters erfolgte, unterscheiden sich die auf der Abgastemperatur basierenden Signalverläufe der drei Kraftstoffe mit unterschiedlich hoher Konzentration an aschebildenden Elementen kaum. Die ausgeprägten Schwankungen der Signalverläufe sind vermutlich überlagerten Reinigungseffekten zuzuschreiben (siehe Kapitel 8.2.5).

Aufgrund des im Vergleich zu Einspritzdüsenablagerungen geringen motorischen Einflusses von Ablagerungen an Brennraumdecke, Kolben oder Ventilen ist ein Sättigungseffekt an diesen Bauteilen nur schwer nachzuweisen. Die in Kapitel 6.1.3.3 abgebildeten Endoskopiebilder lassen in keinem der drei Bereiche eindeutige Sättigungseffekte erkennen. Ob das Wachstum an bereits belegten Stellen linear, exponentiell oder asymptotisch verläuft, kann aufgrund der langen Laufzeiten zwischen den einzelnen endoskopischen Untersuchungen nicht näher ermittelt werden. Zur weiteren Untersuchung sind daher Aufnahmen mit höherer zeitlicher Auflösung sowie direkte Schichtdickenmessungen oder alternativ eine kontinuierliche Messung der Oberflächentemperatur entsprechender Bereiche im Betrieb erforderlich.

8.2.5 Einfluss des Reinigungseffekts

Analog zum Sättigungseffekt basiert der prognostizierte Reinigungseffekt auf der Annahme, dass Ablagerungen nur bis zu einer bestimmten Dicke stabil anwachsen können. Darüber hinaus werden insbesondere an der Einspritzdüse auch hydraulische Reinigungsvorgänge durch die Kraftstoffstrahlen vermutet.

Das Auftreten von Reinigungseffekten an der Einspritzdüse konnte grundsätzlich nachgewiesen werden („Abplatzer“, siehe Kapitel 7.5). Allerdings ist noch keine Gesetzmäßigkeit hinter den Ereignissen erkennbar.

Die aufgetretenen Reinigungsvorgänge können nach Häufigkeit und Grad der Reinigung unterschieden werden. Die Untersuchungen zum Einfluss des Temperaturniveaus der Einspritzdüse legen die Vermutung nahe, dass schnell wachsende Ablagerungen (verursacht durch schlechte Kraftstoffqualität und eventuell hohe Bauteiltemperaturen) weniger stabil sind und daher häufiger abplatzen als langsam anwachsende Ablagerungen.

Ein durch weitere zukünftige Untersuchungen noch zu vertiefendes Verständnis der für die Einleitung eines Reinigungsvorgangs erforderlichen Randbedingungen ermöglicht die Definition von Betriebsstrategien zur Regeneration von beladenen Einspritzdüsen, ähnlich der Betriebsstrategien zur Regeneration von Partikelfiltern.

Unabhängig vom Grad der Reinigung ist ein vollständiger Abbau der Ablagerungen im Betrieb jedoch praktisch ausgeschlossen.

8.3 Bewertung der Thesen zu Auswirkungen von Ablagerungen

Anhand der durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss des Kraftstoffs, des Betriebsprofils und der konstruktiven Ausführung sowie den Ergebnissen aus der Untersuchung verschiedener Methoden zur Online-Erkennung erfolgt eine Neubewertung der in Kapitel 4.2 auf Basis der Literaturstudie erstellten Beurteilung von Sensitivität und Relevanz verschiedener Ablagerungsorte. In Tabelle 32 ist das Ergebnis der Neubewertung gegenüber den ursprünglich angenommenen Bewertungszahlen (in Klammern) dargestellt.

Tabelle 32: Beurteilung von Sensitivität und Relevanz von Ablagerungen (2)

		Sensitivität (Σ je Primäreffekt = 100)			Relevanz ($\Sigma = 100$)
		Kraftstoff, Schmierstoff	Temperatur- niveau	Betriebsprofil	
Primäreffekte	Brennraum	60 (60)	30 (20)	10 (10)	10 (10)
	Einspritzdüse	80 (50)	10 (20)	10 (30)	70 (50)
	Partikelfilter	90 (80)	10 (10)	0 (10)	20 (40)

In den nachfolgenden Unterkapiteln ist die ermittelte Sensitivität und Relevanz für die einzelnen Bauteilbereiche im Detail beschrieben.

8.3.1 Brennraum

Wie frühere Untersuchungen sowie die Auswertungen der Untersuchungen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung gezeigt haben, erfolgt grundsätzlich nach jeder Neuinbetriebnahme eines Verbrennungsmotors eine von der Zusammensetzung des Kraftstoffs unabhängige Ablagerungsbildung in den Totvolumina des Brennraums (Feuerstegbereich, Einspritzdüsenbohrung). Die dadurch erfolgende Volumenänderung ist messtechnisch über die Änderung des Verdichtungsverhältnisses erfassbar.

Bei der nachfolgenden Betrachtung der Sensitivität und Relevanz von Brennraumablagerungen wird diese in jedem Fall auftretende Art der Ablagerungsbildung jedoch nicht weiter berücksichtigt, sondern nur auf die von den Kraftstoffelementen Phosphor, Calcium und Magnesium verursachten Ablagerungen eingegangen.

Sensitivität

Die Ventiltellerflächen von Ein- und Auslassventil zeigen eine große Sensitivität gegenüber dem Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalt des Kraftstoffs. Hier sind zwischen den einzelnen untersuchten Kraftstoffzusammensetzungen deutliche Unterschiede in der Beladung zu sehen. Wesentlich weniger ausgeprägt zeigen sich die Abstufungen der unterschiedlichen Kraftstoffe an Kolben und Brennraumdecke.

Ein signifikanter Einfluss des Betriebsprofils konnte an keinem der Bauteile nachgewiesen werden, es kann aber davon ausgegangen werden, dass Thermospannungen in den Ablagerungen aufgrund wechselnder Betriebspunkte ein Abplatzen von Brennraumablagerungen begünstigen.

Hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung zeigt sich an allen Bauteilen ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Ablagerungsbildung. Diese beginnt immer zuerst an den Stellen mit der lokal höchsten Temperatur und breitet sich von dort in Bereiche niedrigerer Oberflächentemperaturen aus. Besonders deutlich ist dieser Effekt am Ventilteller des Auslassventils zu sehen, weniger eindeutig und mit dem Spritzbild der Einspritzdüse überlagert auch an Kolben und Brennraumdecke.

Relevanz

Die Relevanz von Ascheablagerungen im Brennraum auf das Betriebs- und Emissionsverhalten ist als gering einzustufen. Signifikante Änderungen des Verdichtungsverhältnisses sind bei den geringen Ablagerungsvolumina nicht zu erwarten. Die isolierende Ascheschicht könnte theoretisch zwar zu lokal höheren Brennraumtemperaturen führen, daraus resultierende Auswirkungen konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Aufgrund der pulverigen Konsistenz der Ablagerungen ist mit einer mechanischen Schädigung auch dann nicht zu rechnen, wenn sich die Ablagerungen von Zeit zu Zeit ablösen.

8.3.2 Einspritzdüse

Sensitivität

Die Einspritzdüse weist eine sehr hohe Sensitivität gegenüber der Kraftstoffzusammensetzung auf. Im Gegensatz zum Partikelfilter ist das Beladungsverhalten der Einspritzdüse jedoch nur sehr schwer prognostizierbar, da hier sowohl Sättigungs- als auch Reinigungseffekte auftreten. Eine exemplarisch durchgeführte Analyse der Beläge an der Einspritzdüsenkuppe zeigte die deutliche Abhängigkeit der Beläge von der Kraftstoffzusammensetzung (siehe Kapitel 8.2.1)

Der Einfluss konstruktiver Maßnahmen (untersucht wurde das Verhalten bei unterschiedlichen Temperaturniveaus) sowie des Betriebsprofils ist im Vergleich zum Kraftstoffeinfluss nur schwach ausgeprägt, die genauen Wirkmechanismen sind noch nicht ausreichend geklärt. Teilweise konnte eine lochselektive Belagsbildung festgestellt werden, wobei diese sowohl von der Lage der jeweiligen Spritzlöcher im Brennraum als auch vom Grad der Umlenkung des Kraftstoffstrahls in der Düsenkuppe und der daraus resultierenden Strömung im Düsenloch abhängig sein kann. Hier liegt möglicherweise noch konstruktives Verbesserungspotenzial.

Trotz der nur eingeschränkt möglichen Quantifizierung von Belägen an der Einspritzdüse haben die Untersuchungen gezeigt, dass – im Gegensatz zum Partikelfilter – an der Einspritzdüse bereits kleine Mengen an aschebildenden Substanzen im Kraftstoff ausreichen, um signifikante Belagsbildung hervorzurufen.

Relevanz

Der Zustand der Einspritzdüse bzw. die daraus resultierende Strahlausbreitung und Gemischbildung ist die Haupteinflussgröße auf die Verbrennung und damit auf das Betriebs- und Emissionsverhalten eines Verbrennungsmotors.

Bei der differenzierten Beurteilung der Relevanz von Einspritzdüsenablagerungen muss nach der Art der von der Ablagerung ausgehenden Funktionsbeeinflussung unterschieden werden. Ablagerungen reduzieren den hydraulischen Durchfluss und beeinflussen die Zerstäubung negativ, beide Effekte führen zu einer verschlepten und eventuell unvollständigen Verbrennung. Die Auswirkungen von derartigen Ablagerungen auf das Betriebs- und Emissionsverhalten sind in den Kapiteln 6.1.1, 6.1.2 und 7.5 dargestellt.

Die Untersuchungen dieser Arbeit haben gezeigt, dass zwischen einem langsamen kontinuierlichen und im Betrieb nicht reversiblen Aufbau von Ablagerungen im Spritzlochbereich und einem überlagerten schnellen und teilweise reversiblen Ablagerungsaufbau („Abplatzer“) außen auf der Einspritzdüse unterschieden werden kann.

Eine detaillierte Untersuchung der Verbrennung direkt vor und nach einem Abplatzvorgang zeigt deutlich, dass der hydraulische Durchfluss der Einspritzdüse dadurch typischerweise nicht beeinflusst wird. Es platzen in der Regel nur außen auf der Düsenkuppe aufgebaute Ablagerungen ab, welche einen sehr großen Einfluss auf das Strahlbild der Düse und damit auf die Kraftstoffzerstäubung und die Verbrennung haben.

8.3.3 Partikelfilter

Sensitivität

Zwischen dem Gehalt an aschebildenden Elementen des Kraftstoffs und der Bildung bzw. Ablagerung von Asche im Partikelfilter besteht ein direkter, praktisch linearer Zusammenhang (siehe Kapitel 6.1.3.1). Bei bekannter Kraftstoffzusammensetzung und bekanntem Kraftstoffverbrauch ist der Verlauf der nicht reversiblen Aschebelastung sehr gut prognostizierbar. Gleiches gilt für die aus der Zusammensetzung und Menge des im Betrieb verbrannten Schmieröls resultierenden Asche.

Durch eine entsprechende Gestaltung des Filtersubstrats ist es möglich, Partikelfilter trotz hohem Rußabscheidegrad robust gegenüber Aschebelastung auszulegen. Dies kann durch größeres Aschspeichervolumen (z. B. asymmetrische Kanalstruktur oder Sintermetallfiltertaschen) oder durch entsprechend gestaltete Metallträger erfolgen. Derartige Untersuchungen waren nicht Gegenstand dieser Arbeit, es existieren jedoch eine Reihe von Veröffentlichungen zu diesem Thema [168] [196] [127] [3].

Das Betriebsprofil eines Motors hat keinen messbaren Einfluss auf den Verlauf der Aschebelastung. Unterschiede ergeben sich lediglich in der betriebsprofilabhängigen Schichtung von Ruß und Asche.

Relevanz

Wie in der Literaturstudie und eigenen Untersuchungen (Kapitel 6.1.3.1) dargestellt, besteht zwischen der Beladung eines Partikelfilters und der daraus resultierenden Erhöhung der Druckdifferenz über den Filter ein grundsätzlicher Zusammenhang, der allerdings von starken Schwankungen überlagert ist. Ein erhöhter Abgasgegendruck aufgrund eines beladenen Partikelfilters bewirkt bei konstant gehaltener Wellenleistung zunächst eine Verschiebung des Betriebspunkts zu einer höheren Last bei gleicher Drehzahl.

Die daraus resultierenden Änderungen sind in Kapitel 5.4.1 dargestellt. Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW sinkt, der thermische Wirkungsgrad steigt eventuell leicht an. Bei auf eine konstante Generatorleistung geregelten BHKW kann diese Betriebspunktverschiebung über längere Zeit zu einer Überlastung des Motors führen. Daher sind Maßnahmen zur Begrenzung der maximalen Einspritzmenge und/oder Überwachungsmaßnahmen – z. B. der Abgastemperatur – erforderlich.

Darüber hinaus führt ein höherer Abgasgegendruck zu einer Anhebung der internen AGR-Rate, wodurch sich Änderungen im Emissionsverhalten ergeben. Diese wurden bei den untersuchten BHKW jedoch durch andere Effekte überlagert.

Im Vergleich zu den Auswirkungen einer mit Ablagerungen beladenen Einspritzdüse haben die beiden Effekte am Partikelfilter jedoch nur eine geringe motorische Relevanz. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Relevanz von nicht-regenerierbaren Ablagerungen im Partikelfilter als hoch einzustufen, da die Kosten für einen Austausch eines mit Asche beladenen Filters ein Vielfaches gegenüber dem Austausch einer Einspritzdüse betragen.

8.4 Bewertung der Thesen zur Erkennung und Differenzierung von Ablagerungen

Zur quantitativen Bewertung von Ablagerungsbildung anhand aufgezeichneter Betriebsdaten sowie zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die über bislang bekannte Verfahren hinausgehen.

8.4.1 Quantifizierung von Ablagerungsbildung anhand von Zeitreihen

Die Datenerfassung in Zeitreihen ist ein übliches Verfahren zur Erkennung von Veränderungen einer Messgröße über der Zeit. Bildung und Abbau von Ablagerungen können somit anhand geeigneter Messgrößen detektiert werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass hierfür jedoch eine kontinuierliche Datenerfassung erforderlich ist, da Ablagerungsbildung kein kontinuierlich ablaufender Prozess ist, sondern von sprunghaften Ereignissen überlagert wird.

Bei einer ausschließlichen Betrachtung des Anfangs- und des Endzustands eines Prüflaufs bleiben dazwischen liegende Ereignisse verborgen. Typische im Rahmen der Untersuchungen beobachtete Abplatzvorgänge führten zu einer Reduktion der spezifischen Abgastemperatur im Bereich von 20 bis 60 K/kW. Der mittlere Gradient des durch Ablagerungsaufbau verursachten Anstiegs der spezifischen Abgastemperatur lag im Bereich von 0,4 bis 0,6 K/kW pro Betriebsstunde. Daraus ergibt sich, dass ein nicht erfasster Abplatzvorgang der Größe 40 K/kW einer unbemerkten Änderung der Versuchsdauer um 67 bis 100 Betriebsstunden entspricht. Bei

typischen Versuchslaufzeiten von ca. 100 Betriebsstunden entspricht dies einem Fehler von bis zu 100 %!

Die kontinuierliche Erfassung führt jedoch zu einer Datenflut, für deren Auswertung zur Quantifizierung von Ablagerungsbildungsvorgängen kein Verfahren in der Literatur bekannt ist. Mit den in Kapitel 5.4.5 beschriebenen Verfahren zur Aufteilung einer Zeitreihe in Phasen des Ablagerungsaufbaus und des Ablagerungsabbaus sowie der Berechnung der an Methoden der beschreibenden Statistik angelehnten gewichteten Signalabweichung (GSA) wurden anhand synthetischer Signalverläufe zwei Verfahren entwickelt, die eine quantitative Bewertung von Ablagerungsvorgängen ermöglichen. Mittels der gewichteten Signalabweichung lassen sich auch Störeinflüsse auf Messgrößen, die nicht der Ablagerungsbildung zuzuschreiben sind, wirksam filtern.

Die Untersuchungen zum Einfluss des Kraftstoffs mit zwei baugleichen BHKW haben gezeigt, dass neben Sprungereignissen auch das Laufverhalten zu einer Fehlinterpretation bezüglich des Ablagerungsaufbaus führen kann. Als Beispiel sei hierfür der Taktbetrieb der beiden BHKW mit RÖK 1 aufgeführt. Aufgrund des eingesetzten Kraftstoffs ist in beiden Fällen eine vergleichbare, äußerst geringe Ablagerungsbildung zu erwarten. Die Mehrzahl der Ergebnisse der visuellen Beurteilung der brennraumseitigen Bauteiloberflächen sowie die Massenzunahme der jeweiligen DPF bestätigen dies. Dennoch würde die ausschließliche Betrachtung der Änderung der spezifischen Abgastemperatur aufgrund des Anfangs- und Endzustands einen Unterschied zwischen den beiden BHKW von fast 400 % (bezogen auf die Änderung bei BHKW 1) ergeben. Im Vergleich dazu beträgt der Unterschied bei der Betrachtung der gewichteten Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur nur 4 % (ebenfalls bezogen auf BHKW 1). Diese Betrachtung ist ebenfalls nur mittels kontinuierlicher Datenerfassung möglich.

8.4.2 Online-Erkennung von Ablagerungsbildung

Die Online-Erkennung von Ablagerungsbildung stellt eine Erweiterung der kontinuierlichen Datenaufzeichnung dar. Damit können Ablagerungsvorgänge bereits im Moment ihres Auftretens erkannt und differenziert werden, um so den Motor vor Schäden zu schützen bzw. Regenerationsmaßnahmen zum Abbau von Ablagerungen einzuleiten. Weiterhin liefern einige der untersuchten Verfahren Daten zum tieferen Verständnis der Ablagerungsvorgänge, insbesondere an der Einspritzdüse.

In mehreren Versuchsreihen wurden unterschiedliche Methoden der Online-Erkennung untersucht, welche sich hinsichtlich des erreichbaren Differenzierungsgrads und der dafür erforderlichen Messtechnik unterscheiden.

Zur allgemeinen Erkennung von Ablagerungsbildung im Motorsystem eignen sich insbesondere die spezifische Abgastemperatur sowie der maximale Zylinderdruck. Beide Verfahren liefern mit einem – auch für Serienanwendungen – vertretbaren Aufwand zuverlässige Informationen über den Beladungsgrad von Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem.

Um die Aussagekraft der Abgastemperatur zu überprüfen, wurde deren Verhalten im Vergleich zu weiteren, das Betriebs- und Emissionsverhalten beschreibenden, Messgrößen untersucht. Aus diesen Vergleichen geht hervor, dass durch die ausschließliche Betrachtung der spezifischen Abgastemperatur ein großer Teil der durch Ablagerungsbildung hervorgerufenen Änderungen des Betriebs- und Emissionsverhaltens erfasst werden kann. Die Betrachtung weiterer Messgrößen ist dann erforderlich, wenn die Ablagerungsbildung genauer differenziert werden soll.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Aussage des maximalen Zylinderdrucks stellen eine Ergänzung der in anderen Arbeiten zum Einsatz von Zylinderdrucksensorik bereits beschriebenen Anwendungen dar. Hervorzuheben ist dabei besonders, dass bei dem hier untersuchten Verfahren zur Ablagerungserkennung die Lage des maximalen Zylinderdrucks in

Bezug zum Kurbelwinkel ohne Bedeutung ist. Eine zusätzliche genaue Erfassung der Kurbelwellenposition ist daher nicht erforderlich.

Eine differenzierte Betrachtung der Einspritzdüse bedingt wesentlich aufwändigere Messtechnik. So basieren die Verfahren zur Erfassung der **hydraulischen Vorgänge an der Einspritzdüse** auf der Messung von Kraftstoffverbrauch, Öffnungsdauer der Einspritzdüse und Einspritzleitungsdruckverlauf bzw. Maximaldruck.

Die Ergebnisse zeigen, dass die prinzipielle Vorgehensweise zur Online-Ermittlung des hydraulischen Durchflusses funktioniert, allerdings noch weiterer Untersuchungen bedarf. Insbesondere die Vorgänge während der Öffnungs- und Schließphase der Düsennadel sowie die genauen Druckverhältnisse am Spritzloch sind in den vorgestellten Modellen nicht berücksichtigt.

Durch Integration der theoretisch eingespritzten Kraftstoffmenge unter Berücksichtigung des Einspritzleitungsdruckverlaufs konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den klassischen stationären Verfahren zur Bestimmung des hydraulischen Durchflusses und dem Online-Verfahren erzielt werden. Der dafür erforderliche Mess- und Rechenaufwand ist jedoch aus heutiger Sicht in Serienanwendungen nicht umsetzbar.

Ein daraus abgeleitetes vereinfachtes Verfahren, welches durch empirische Versuche mit der Realität abgeglichen wurde, zeigt eine größere Abweichung, allerdings bei deutlich verringertem Mess- und Rechenaufwand. Ähnlich den zylinderdruckbasierten Verfahren kann auch hier auf eine Kurbelwinkelzuordnung verzichtet werden.

Beide Verfahren wurden anhand der typischen Charakteristika einesnockengesteuerten Einspritzsystems entwickelt. Eine Übertragbarkeit auf andere Systeme muss daher kritisch überprüft werden.

Neben der Änderung der hydraulischen Eigenschaften einer Einspritzdüse wird auch die **Strahlausbreitung** und daraus resultierend die **Gemischbildung** beeinflusst. Diese Effekte konnten durch die Betrachtung des Verzugs zwischen Einspritzbeginn und einer definierten Umsatzrate der Verbrennung sehr gut beschrieben werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere bei Betrachtung des 5 %- und des 10 %-Umsatzpunktes praktisch kein Einfluss des hydraulischen Durchflusses zu erkennen ist. Der mittels des 5 %-Umsatzpunktes berechnete Verbrennungsverzug ist zudem unabhängig von der Motorleistung.

Ein Vergleich der beiden Methoden, welche die Vorgänge an der Einspritzdüse beschreiben, zeigte ein plausibles Verhalten des Verbrennungsverzugs bzw. der daraus abgeleiteten Gemischbildungsqualität. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich von der Kraftstoffzusammensetzung abhängige Ablagerungen an der Einspritzdüse vorwiegend außen auf der Düsenkuppe bilden und in erster Linie die Strahlausbreitung beeinflussen. Diese Ablagerungen können im laufenden Betrieb spontan abplatzen und damit zu einer sprunghaften Verbesserung der Verbrennung (ermittelt anhand einer Verkürzung des Verbrennungsverzugs) führen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der grundlegende Zusammenhang zwischen dem motorischen Verhalten eines mit Rapsölkraftstoff betriebenen Verbrennungsmotors und der eingesetzten Kraftstoffqualität bzw. -zusammensetzung wurde bereits in vielen vorangegangenen Arbeiten erforscht und beschrieben. Trotz der Vielzahl derartiger Untersuchungen blieben wichtige Zusammenhänge zwischen Kraftstoffeigenschaften und motorischem Verhalten ungeklärt, insbesondere was die Bildung von Ablagerungen im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem betrifft. Ein starker Einfluss des Gehalts der Elemente Phosphor, Calcium und Magnesium im Kraftstoff auf die Ablagerungsbildung wird zwar von vielen Autoren vermutet, allerdings sind die Ergebnisse teilweise widersprüchlich. Dies ist vermutlich auf unterschiedliche Randbedingungen der jeweiligen Untersuchungen zurück zu führen, die oft nicht vollständig beschrieben sind. So fehlen teilweise genaue Angaben zum eingesetzten Kraftstoff, den Betriebsprofilen oder der Art der Umrüstung der untersuchten Motoren. Aus vielen Veröffentlichungen sind außerdem nur zeitlich niedrig aufgelöste Messdaten bekannt, oft nur Anfangs- und Endwerte eines Prüflaufs.

Trotz aller Einschränkungen liefern die in der Literatur geschilderten Arbeiten einen wichtigen Beitrag, um die grundsätzlichen Zusammenhänge aufzuzeigen und somit gezielt weiterführende Studien durchzuführen.

Ziel der Untersuchungen dieser Arbeit war es, anhand unterschiedlicher Rapsölkraftstoffqualitäten den Einfluss der Elementgehalte Phosphor, Calcium und Magnesium von Rapsölkraftstoff auf die Ablagerungsbildung im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem zu untersuchen. Weiterhin wurde überprüft, ob der Kraftstoffeinfluss durch konstruktive Maßnahmen zur Änderung der Temperatur an der Einspritzdüsen Spitze (Änderung der Wärmeabfuhr in den Zylinderkopf) oder alternative Betriebsprofile (Dauerlauf, Taktbetrieb mit unterschiedlichen Lauf- und Stillstandszeiten) abgemildert werden kann.

Neben der Auswertung von Daten nach einem Prüflauf sollte überprüft werden, mit welchen Methoden Ablagerungsbildung bei Verbrennungsmotoren bereits im laufenden Betrieb erkannt und bis zu welchem Grad differenziert werden kann.

Dazu wurden im Labor Einzeluntersuchungen und Langzeitprüfläufe an zwei baugleichen BHKW durchgeführt. Zum Einsatz kamen fünf Rapsölkraftstoffe mit unterschiedlichen Konzentrationen an Phosphor ($< 0,5 - 91,9$ mg/kg) sowie Calcium und Magnesium (Summengehalt $< 0,5 - 78,0$ mg/kg).

Die Beurteilung der Ablagerungsbildung erfolgte durch die Auswertung geeigneter Messdaten sowie durch visuelle Befundung relevanter Bauteile nach einzelnen Prüfläufen.

Vor dem Hintergrund der Normungsarbeit zur Schaffung einer DIN-Norm für Rapsölkraftstoff sollte überprüft werden, ob allgemeingültige absolute Grenzwerte für die Elementgehalte Phosphor, Calcium und Magnesium definiert werden können.

Ergebnisse der Arbeit

Im Gegensatz zu den bislang veröffentlichten Arbeiten zur Ablagerungsbildung wurden im Rahmen dieser Arbeit bei allen Versuchsreihen die wichtigsten, das Betriebsverhalten beschreibenden, Messgrößen kontinuierlich und zeitlich hoch aufgelöst aufgezeichnet (Aufzeichnungsrate 1 Hz) und ausgewertet. Dieses Vorgehen ist unabdingbar für die richtige Interpretation der Ergebnisse, da Ablagerungsbildung insbesondere im Brennraum kein kontinuierlich ablaufender Vorgang ist, sondern von scheinbar zufälligen sprunghaften Ereignissen überlagert wird.

Auf Basis der mittels kontinuierlicher Datenaufzeichnung gewonnenen Daten wurde ein neues Verfahren zur effektiven Auswertung des Verlaufs der Ablagerungsbildung entwickelt. Dies beinhaltet die Berechnung der an die Methoden der beschreibenden Statistik angelehnten

gewichteten Signalabweichung (GSA) von zeitbasierten Messreihen sowie die Differenzierung von Betriebsphasen des Ablagerungsauf- und -abbaus (mittlerer Gradient der Zeitabschnitte positiver bzw. negativer Steigung). Damit können gegenüber der ausschließlichen Betrachtung von Anfangs- und Endzustand wesentlich robustere Ergebnisse ermittelt, sowie bislang noch nicht beschriebenes Verhalten beim Ablagerungsauf- und -abbau erfasst und ausgewertet werden. Die Verfahren tragen zu einer wesentlichen Verbesserung der Qualität der Ergebnisse aus Ablagerungsuntersuchungen bei, indem das Risiko von Fehlinterpretationen deutlich verringert wird.

In Abbildung 116 sind die mit verschiedenen Auswertungsverfahren ermittelten Unterschiede zwischen den zwei baugleichen BHKW beim Betrieb mit identischem Kraftstoff und Betriebsprofil dargestellt. Die ausschließliche Betrachtung von Anfangs- und Endzustand ergibt einen scheinbaren Unterschied der Auswirkung von Ablagerungsbildung zwischen den beiden BHKW von annähernd 400 % (bezogen auf BHKW 1). Dieser Wert ist aufgrund der mit diesem Kraftstoff zu erwartenden äußerst geringen Anlagerungsbildung jedoch unrealistisch. Nach den oben beschriebenen neuen Auswertungsverfahren beträgt der Unterschied zwischen beiden BHKW nur noch realistische 4 % bis 12 %.

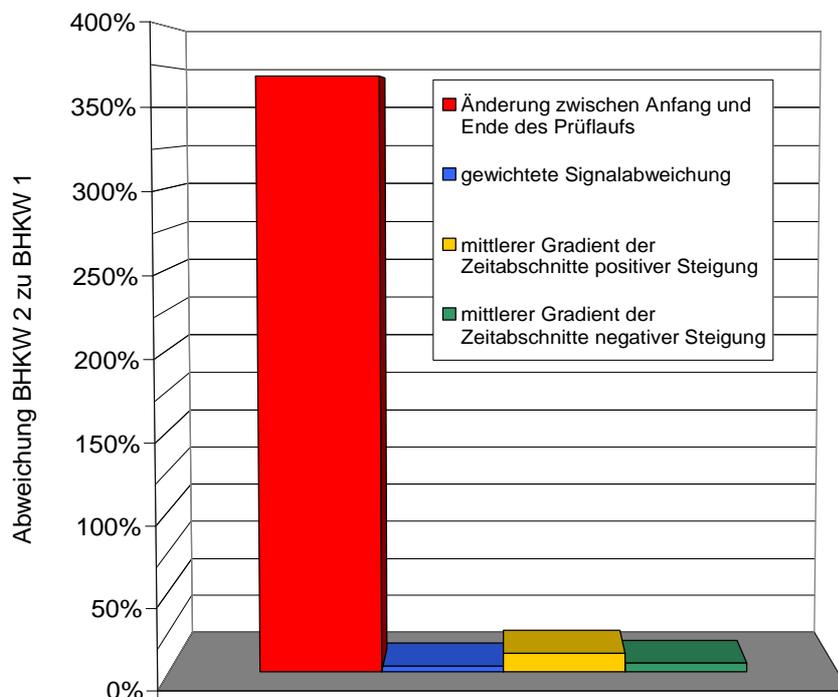


Abbildung 116: Vergleich verschiedener Auswertungsverfahren am Beispiel der spezifischen Abgas-temperatur (Prüflauf "Taktbetrieb mit RÖK 1")

Dieses Beispiel zeigt, dass eine kontinuierliche Messdatenerfassung die Grundlage für eine richtige Interpretation der Ereignisse ist. Anderenfalls ist die Übertragbarkeit von Ergebnissen selbst bei baugleichen Motoren aufgrund der Zufälligkeit von Ereignissen und anderen Quereinflüssen nicht möglich. Es ist zu vermuten, dass widersprüchliche Aussagen vorangegangener Untersuchungen hauptsächlich auf nicht-kontinuierliche Datenerfassung und -auswertung und die daraus resultierende Nichtbetrachtung von Abplatzvorgängen zurückzuführen sind.

Als Erweiterung zu der bereits von Beginn als absolut notwendig erachteten kontinuierlichen und zeitlich hochaufgelösten Messdatenerfassung wurden im Rahmen der Arbeit verschiedene Methoden zur **Online-Erkennung von Ablagerungsbildung** im laufenden Betrieb entwickelt.

Bei der Entwicklung und Auswahl von Methoden zur Erkennung von Ablagerungen muss grundsätzlich nach dem gewünschten oder erforderlichen Grad der Differenzierung unterschieden werden. Entsprechend diesem reicht die Bandbreite an möglichen Verfahren von einer einfachen Temperaturmessung bis hin zur mess- und rechenintensiven Verarbeitung von kurbelwinkelaufgelösten Einspritz- oder Verbrennungsgrößen.

Zur grundsätzlichen Erkennung von Ablagerungsvorgängen eignet sich insbesondere die spezifische Abgastemperatur des Motors. In Kombination mit der Erfassung des maximalen Zylinderdrucks während der Verbrennung konnte eine neue Methode definiert werden, mit der ohne zusätzliches Kurbelwinkelsignal zwischen Ablagerungen im Brennraum und Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem unterschieden werden kann.

Die Messung dieser beiden Größen kann somit als Grundlage dienen, um während des Betriebs sowohl die Ablagerungsbildung im Brennraum als auch im Abgasnachbehandlungssystem getrennt zu erfassen und bei Bedarf spezielle Betriebszyklen einzuleiten. Der Serieneinsatz entsprechender Sensorik wird zurzeit von verschiedenen Stellen intensiv zur Serienreife entwickelt, um für zukünftige Abgasnormen alternative Regelstrategien für Verbrennungsmotoren zu ermöglichen.

Weitere Verfahren wurden zur qualitativen Beurteilung der Einspritzdüse bei laufendem Motorbetrieb entwickelt. Mit ihnen ist es möglich, sowohl Änderungen im hydraulischen Verhalten der Einspritzdüse als auch Änderungen der Güte der Zerstäubung der Kraftstoffstrahlen getrennt zu erfassen. Das hydraulische Verhalten wird ähnlich der bei Herstellern von Einspritzdüsen üblichen Bestimmung des hydraulischen Durchflusses bestimmt. Zur Quantifizierung der Güte der Zerstäubung wurde die neue Messgröße „Verbrennungsverzug“ definiert, die eine Erweiterung des Zündverzugs darstellt.

Beide Verfahren tragen wesentlich zum Verständnis insbesondere der Abbauvorgänge von Ablagerungen („Abplatzer“) bei.

Die Untersuchung der aufgestellten Thesen zum **Einfluss der Betriebsstoffe** (Kraftstoff und Schmieröl) auf die Ablagerungsbildung bestätigte den bereits in Untersuchungen anderer Autoren ermittelten grundsätzlichen Zusammenhang zwischen der Kraftstoffqualität und dem Betriebsverhalten eines Verbrennungsmotors. Durch den gezielten Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe mit zuvor definierten Elementgehalten konnte der Einfluss des Kraftstoffs weiter präzisiert werden. Die Kraftstoffzusammensetzung definiert den Gradienten, mit dem im Gesamtsystem bestehend aus Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem (DPF) Ablagerungsaufbau über der Betriebszeit stattfindet. In Tabelle 33 ist die Änderung der zur Beurteilung der Abagerungsbildung ausgewählten Kenngrößen für die untersuchten Kraftstoffe in Relation zum Referenzkraftstoff RÖK 1 dargestellt.

Tabelle 33: Änderung der die Ablagerungsbildung beschreibenden Größen bezogen auf RÖK 1

	RÖK 1	RÖK 2	RÖK 3	RÖK 4
Gewichtete Signalabweichung	0 %	+ 87,80 %	+ 90,91 %	+ 152,35 %
mittlerer Gradient der Zeitabschnitte positiver Steigung	0 %	+ 30,52 %	+ 33,07 %	+ 45,14 %

Wie Tabelle 33 zeigt, kann innerhalb der Gruppe der untersuchten Kraftstoffe mit einem Elementgehalt von Phosphor, Calcium und Magnesium > 0,5 mg/kg (RÖK 2 – RÖK 4) keine Schwelle ermittelt werden, ab deren Überschreitung sich das Ablagerungsverhalten grundsätzlich ändert. Eine Definition von absoluten Grenzwerten deutlich oberhalb dieses derzeit als Nachweisgrenze geltenden Wertes ist daher aus motorischer Sicht nicht sinnvoll.

Ein Einfluss der Bauteiloberflächentemperatur liegt nur im Brennraum vor. Insbesondere an Kolben und Ventilen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der brennraumseitigen Oberflächentemperatur und dem Gradienten der Ablagerungsbildung. Die dort ablaufenden Vorgänge zeigen einen eindeutigen Langzeittrend und sind grundsätzlich prognostizierbar. An der Brennraumdecke und der Einspritzdüse ist dieser Zusammenhang weniger stark ausgeprägt und wird von anderen Einflüssen überlagert. Der ermittelte Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der Ablagerungsbildung steht dabei im Widerspruch zu den in der Literatur für den Transport von Ablagerungen genannten Mechanismen Thermodiffusion und Thermophorese.

Die darüber hinaus vermuteten Einflüsse des **Betriebsprofils** sowie die Auswirkungen von **Sättigungs- und Reinigungseffekten** sind nicht eindeutig und nicht oder nur sehr schwer prognostizierbar. Sie überlagern teilweise die durch die Kraftstoffzusammensetzung vorgegebene „Grundsteigerung“ der Ablagerungsbildung.

Die Mechanismen der Ablagerungsbildung müssen für Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem getrennt betrachtet werden, da sie nach unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten ablaufen. Des Weiteren gibt es große Unterschiede in den Auswirkungen von Ablagerungen auf das Betriebsverhalten des Motors. Eine Bewertung der Ablagerungsorte „Einspritzdüse“, „Brennraum“ und „Abgasnachbehandlungssystem“ hinsichtlich der motorischen Relevanz ist in Abbildung 117 dargestellt.

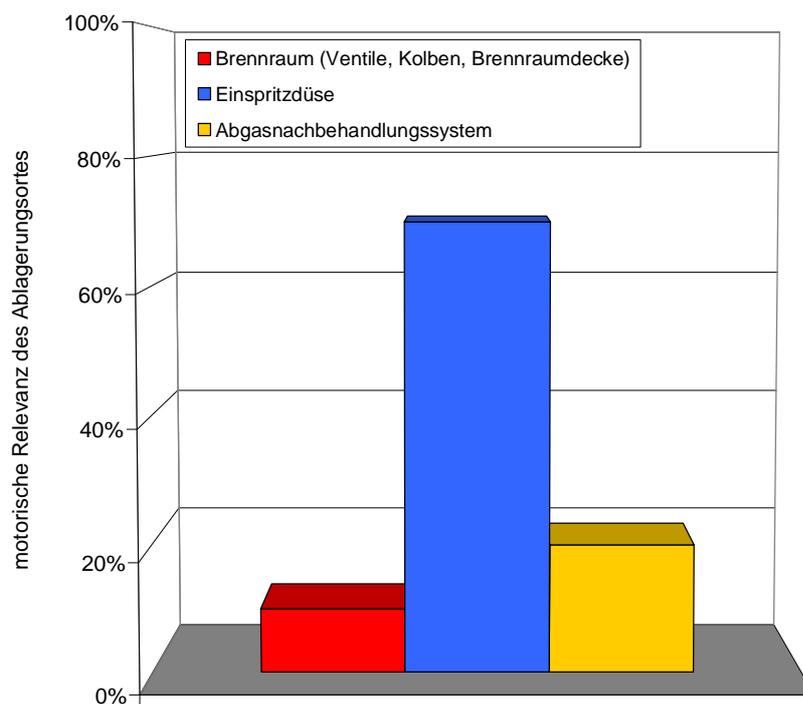


Abbildung 117: Vergleich der motorischen Relevanz verschiedener Ablagerungsorte

Im **Brennraum** erfolgen die Bildung sowie die Ablagerung eines kleinen Prozentsatzes des ablagerungsfähigen Materials. Die ablaufenden Vorgänge sind sehr dynamisch und teilweise reversibel. Obwohl die Ablagerungsmenge im Brennraum wesentlich geringer ist als im Partikelfilter, können im Brennraum bereits kleinste Ablagerungsmengen das Betriebs- und Emissionsverhalten sehr stark beeinflussen.

Die größten Auswirkungen haben dabei Ablagerungen an der **Einspritzdüse**. Diese stören die Gemischbildung und führen damit zu höheren Abgastemperaturen, höherem Kraftstoff-

verbrauch und schlechterem Emissionsverhalten. Verschiedene Verfahren zur Quantifizierung der Ablagerungsbildung an ausgebauten Einspritzdüsen führten nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen, so dass eine Quantifizierung anhand der bereits vorgestellten Messgrößen aus der Online-Erkennung sinnvoller erscheint. Diese beschreiben das Verhalten der Einspritzdüse unter realen Einsatzbedingungen, was gegenüber einer in der Regel unter Umgebungsbedingungen stattfindenden Beurteilung im ausgebauten Zustand zu bevorzugen ist. Bei einer Beurteilung im ausgebauten Zustand besteht weiterhin das Risiko, dass kurz vor oder während dem Ausbau eine mechanische Veränderung der Ablagerungen erfolgt (Abplatzen von besonders exponierten Ablagerungsteilen), wodurch die Ergebnisse der anschließenden Beurteilung verfälscht werden.

Ablagerungen auf **Ventilen**, **Kolben** oder **Brennraumdecke** sind für das Betriebsverhalten des Motors weitaus weniger kritisch. Theoretisch können Ablagerungen an Kolben zu einer Verklebung der Kolbenringe sowie an Ventilen zum Klemmen des Ventils im Ventilschaft führen. Diese Fälle sind, wie in Untersuchungen anderer Autoren beschrieben, jedoch nicht auf den Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium, sondern auf andere Kraftstoffeigenschaften (hauptsächlich Oxidationsstabilität und Koksrückstand) sowie auf die konstruktive Gestaltung der Baugruppen Kolbenring - Kolbenringnut und Ventilschaft - Ventilschaftführung zurückzuführen. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind derartige Probleme nicht aufgetreten.

- Die **Ein-** und **Auslassventile** zeigen am Ventilteller eine mit Ascheablagerungen belegte Fläche, welche mit zunehmendem Gehalt an aschebildenden Komponenten immer weiter von der Mitte aus zum Ventilrand anwächst. Zusätzlich zur Abhängigkeit vom Kraftstoff konnte über endoskopische Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeiten der Prüfläufe eine Abhängigkeit der Größe der beladenen Fläche von der Laufzeit nachgewiesen werden. Beide Effekte folgen in ihrer Intensität den Temperaturgradienten der Bauteile und sind am Auslassventil wesentlich stärker ausgeprägt als am Einlassventil, weshalb ein starker Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Ablagerungsbildung vermutet wird. Auf der dem Brennraum abgewandten Rückseite der Ventile ist – bis auf zwei Ausnahmen – kein eindeutiger Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Ablagerungsbildung zu erkennen. Lediglich bei einem der beiden Labor-BHKW war beim Betrieb mit den zwei aschehaltigsten Kraftstoffen ein dünner grauer Belag im Bereich der Hohlkehle auf der Rückseite des Auslassventils zu erkennen.
- Am **Kolben** sind im Bereich der Brennraummulde und in Richtung des Einlassventils ebenfalls aschehaltige Ablagerungen zu beobachten, die teilweise in Richtung der Einspritzstrahlen liegen. Im Unterschied zu den Ventilen ist hier die Abhängigkeit der Ablagerungsbildung vom eingesetzten Kraftstoff zwischen den drei Versuchskraftstoffen mit unterschiedlich hohen Elementgehalten an Phosphor, Calcium und Magnesium wesentlich schwächer ausgeprägt. Deutliche Unterschiede zeigen sich lediglich zum praktisch aschefreien Rapsölvollraffinat. Im Feuerstegbereich ist keine Abhängigkeit der Ablagerungen vom eingesetzten Kraftstoff zu erkennen.
- Ähnlich zum Kolben ist auch an der **Brennraumdecke** der Einfluss des Spritzbildes der Einspritzdüse teilweise zu erkennen. Auch hier sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Kraftstoffen wesentlich geringer als bei den Ventilen.

Im **Abgasnachbehandlungssystem** erfolgt ein mechanisches „Festhalten“ der im Brennraum gebildeten Partikel. Daraus resultiert bei konstanter Kraftstoffzusammensetzung und konstantem Schmierölverbrauch ein annähernd linearer Zuwachs der Beladungsmasse über der Betriebszeit. Im Unterschied zu im Partikelfilter eingelagertem Ruß lassen sich Ascheablagerungen nicht durch entsprechende Regenerationszyklen wieder abbauen. Der Differenzdruck über dem Partikelfilter steigt mit zunehmendem Ascheeintrag an, allerdings ist im Realbetrieb der Zusammenhang zwischen Beladungsmasse und Differenzdruck aufgrund der inhomogenen

Filterbeladung sowie der zyklischen Einlagerung und Regeneration von Ruß nicht stetig linear, sondern wird von einem sehr großen Rauschen überlagert. Das Aschespeichervolumen und die Mindeststandzeit eines DPF legen daher die maximal zulässige Konzentration an Asche bildenden Elementen im Kraftstoff fest. Im Gegensatz zum Brennraum beeinflussen jedoch erst große Mengen an Ablagerungen das Betriebsverhalten signifikant. Von Oxidationsvorgängen abgesehen ist hier praktisch nur der Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung relevant.

Fazit und Ausblick

Mittels kontinuierlicher Datenaufzeichnung und neuer Verfahren zur Erfassung und Auswertung von Ablagerungsauf- und -abbau konnten bestehende Thesen zum Einfluss des Kraftstoffs auf die Ablagerungsbildung präzisiert werden und im Zusammenhang mit weiteren Einflussfaktoren (Temperatur, Betriebsprofil) bewertet werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lieferten einen wesentlichen Beitrag zur weiteren Absenkung der in der Vornorm DIN V 51605 festgelegten Grenzwerte für Phosphor, Calcium und Magnesium. Ausgehend von maximal zulässigen Elementgehalten von 12 mg/kg für Phosphor und 20 mg/kg für den Summengehalt an Calcium und Magnesium sind in der nun fertig gestellten DIN 51605 die zulässigen Obergrenzen für Phosphor mit 3 mg/kg, für Calcium mit 1 mg/kg und für Magnesium mit 1 mg/kg definiert. Eine weitere Absenkung ist derzeit aufgrund der Vergleich- und Wiederholbarkeit der Analyseverfahren nicht möglich.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit abgeleitet, ergeben sich für weitere Arbeiten folgende Aufgaben- bzw. Fragestellungen in den Bereichen:

- Erweiterung des Modells zur Ablagerungsbildung
- Erweiterung der Methoden zur Ablagerungserkennung
- Entwicklung von Strategien zur Ablagerungsvermeidung
- Übertragung der Ergebnisse auf andere Motoren, Einsatzgebiete und Kraftstoffe

Eine Erweiterung des **Modells zur Ablagerungsbildung** ist insbesondere um chemische Aspekte sowie den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit von Bauteilen empfehlenswert. Schwerpunkt sollte hierbei die Betrachtung der Bildung der für die Ablagerung von Aschen im Brennraum erforderlichen Klebeschicht sein.

Die Erweiterung der **Methoden zur Ablagerungserkennung** umfasst mehrere Punkte:

- Weiterer Untersuchungsbedarf besteht hauptsächlich hinsichtlich der Bildungs- und Wirkmechanismen von Ablagerungen an der Einspritzdüse. Aufgrund der dort – aus heutiger Sicht – zufällig und nicht prognostizierbar ablaufenden Vorgänge ist es erforderlich, die Methode zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung im laufenden Motorbetrieb so weiter zu entwickeln, dass Ereignisse an der Einspritzdüse automatisch erkannt und in Zusammenhang mit Randparametern gebracht werden können.
- Das vorgestellte Verfahren zur Online-Berechnung des hydraulischen Durchflusses von Einspritzdüsen bedarf ebenfalls noch weiterer Untersuchungen, sowohl um die Übertragbarkeit auf andere Einspritzsysteme zu überprüfen, als auch um daraus weitere mögliche vereinfachte Methoden abzuleiten, die zu genaueren Ergebnissen als bislang erzielt führen.
- Wie in Kapitel 7.4 erläutert, sollte in weiterführenden Untersuchungen überprüft werden, ob reale Ablagerungen außen auf der Düsenkuppe den in dieser Arbeit angenommenen Einfluss auf hydraulischen Durchfluss und Zerstäubung ausüben. Dazu sollte versucht werden, von stark beladenen Einspritzdüsen ausschließlich die Ablagerungen außen auf der Düsenkuppe zu entfernen.

Auf Basis der mit den bereits umgesetzten Methoden und den oben vorgeschlagenen weiteren Ansätzen gewonnenen Erkenntnisse zum Ablagerungsauf- und -abbau sollte untersucht werden, welche **Strategien zur Ablagerungsvermeidung** zielführend sind.

Dabei sollte zunächst versucht werden, mittels konstruktiver Maßnahmen den Ablagerungsaufbau soweit als möglich zu verlangsamen. Besondere Betrachtung verdient hierbei der Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Ablagerungsbildung. An drei von vier Bauteilen konnten im Rahmen dieser Untersuchungen eindeutig temperaturabhängige Ablagerungsmechanismen festgestellt werden. Mithilfe von Simulationsrechnungen zur Temperaturverteilung, Applikation von geeigneten Bauteilen mit Temperaturmesstechnik und einem geeigneten Versuchsprogramm kann die These zur Temperaturabhängigkeit der Ablagerungsbildung weitaus genauer untersucht werden, als dies im Rahmen dieser Arbeit möglich war.

Zusätzlich ist zu prüfen, wie durch Wahl einer entsprechenden Betriebsstrategie eine aktive Beeinflussung des Ablagerungsauf- und -abbaus erfolgen kann. Ziel einer solchen Betriebsstrategie ist es, insbesondere Brennraumablagerungen zu regenerieren, d. h. das Abplatzen von Ablagerungen zu initiieren.

Schließlich ist die **Übertragung der Ergebnisse auf andere Motoren, Einsatzgebiete und Kraftstoffe** über die im Rahmen dieser Arbeit getroffenen Aussagen hinaus zu überprüfen.

Auf motorischer Seite sind Motoren mit größerer Zylinderleistung und abweichendem Hub-Bohrungs-Verhältnis zu betrachten. Die Online-Verfahren zur Beurteilung der Einspritzdüse müssen dabei insbesondere bei Motoren mit nicht-nockengesteuertem Einspritzsystem verifiziert werden.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einsatzgebiete von Verbrennungsmotoren muss ebenfalls kritisch geprüft werden. Abweichende Drehzahl-Last-Kollektive sowie ein hoch dynamischer Betrieb können zu vom Stationärbetrieb abweichendem Ablagerungsverhalten führen.

Schließlich sind die Ergebnisse und Methoden auf ihre Anwendbarkeit beim Betrieb mit anderen Kraftstoffen, Additivbeimischungen und Kraftstoffmischungen aus pflanzlichen und mineralischen Kraftstoffen zu untersuchen. Insbesondere bei Kraftstoffmischungen sollte geklärt werden, ob dort ein proportionaler Zusammenhang zwischen Beimischung und Ablagerungsbildung vorliegt oder ob bereits kleine Beimischungen das motorische Verhalten signifikant verändern.

10 Literaturverzeichnis

- [1] ASG ANALYTIK-SERVICE GESELLSCHAFT MBH (2006): Infobrief 09/06: Einsatz von Sojaöl als Kraftstoff. http://www.asg-analytik.de/Downloads/Infobriefe/Infobrief_2006_09.pdf, - 21.08.2008
- [2] ANDREWS, G. E.; ABDELHALIM, S.; ABBASS, M. K.; ASADI-AGHDAM, H. R.; WILLIAMS, P. T.; BARTLE, K. D. (1992): The Role of Exhaust Pipe and Incylinder Deposits on Diesel Particulate Composition. SAE Technical Paper Series 921648
- [3] ARAVELLI, K.; HEIBEL, A. (2007): Improved Lifetime Pressure Drop Management for Robust Cordierite (RC) Filters with Asymmetric Cell Technology (ACT). SAE Technical Paper Series 2007-01-0920
- [4] ARGUEYROLLES, B.; DEHUX, S.; GASTALDI, P.; GROSJEAN, L.; LEVY, F.; MICHEL, A.; PASSEREL, D. (2007): Influence of injector nozzle design and cavitation on coking phenomenon. SAE Technical Paper Series 2007-01-1896
- [5] ATTENBERGER, A.; REMMELE, E. (2005): Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff. Straubing: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), ISSN 1614-1008
- [6] BALDAUF, W.; BAFANZ, U. (1994): Verarbeitung von Pflanzenölen zu Kraftstoffen in Mineralöl-Raffinerieprozessen. In: Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheiz-Kraftwerke - Nutzen, Kosten, Perspektiven; Tagung Würzburg, 4. und 5. Juli 1994. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-18-091126-3, S. 153-168
- [7] BARDASZ, E.; COWLING, S.; PANESAR, A.; DURHAM, J.; TADROUS, T.N. (2005): Effects of Lubricant Derived Chemistries on Performance of the Catalyzed Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper Series 2005-01-2168
- [8] BARDASZ, E.; MACKNEY, D.; BRITTON, N.; KLEINSHECK, G.; OLOFSSON, K.; MURRAY, I.; WALKER, A. (2003): Investigations of the Interactions between Lubricant derived Species and Aftertreatment Systems on a State-of-the-Art Heavy Duty Diesel Engine. SAE Technical Paper Series 2003-01-1963
- [9] BARRIS, M.A.; REINHART, S.B.; WAHLQUIST, F.H. (1991): The Influence of Lubricating Oil and Diesel Fuel on Ash Accumulation in an Exhaust Particulate Trap. SAE Technical Paper Series 910131
- [10] BASSHUYSEN VAN, R.; SCHÄFER, F. (Hrsg.) (2006): Lexikon Motorentchnik, 2. Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, ISBN 978-3-528-13903-2
- [11] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (LFU) (2003): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke. http://www.lfu.bayern.de/energie/pflanzenoel/doc/pflanzenoel_blockheizkraftwerke.pdf - 21.08.2008
- [12] BERNSTETTER, A. (2007): Optimierung des Emissionsverhaltens eines pflanzenölbetriebenen PKW's hinsichtlich der Abgasgrenzwerte EURO 4. In: nova-Institut GmbH (Hrsg.): Erster Internationaler Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen. Erfurt: ISBN 987-3-9805840-8-1, S. 283-296
- [13] BIRKNER, C. M. (1995): Untersuchung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Vorstellung eines neuen Pflanzenöl-Motor-Konzeptes. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenwesen
- [14] BITTING, B.; KOHLHEPP, W. (1987): Intake Valve Deposits - Fuel Detergency Requirements Revisited. SAE Technical Paper Series 872117

- [15] BRAUNSCHWEIG, M.; CZARNECKI, T. (2004): On-Board-Diagnose bei Dieselmotoren. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 65, Nr. 7-8, S. 552-557
- [16] BRAUTSCH, M. (1997): Eine vergleichende Gesamtenergiebilanz für Photovoltaik-Module und Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke. Erlangen: Verlag Solare Zukunft, ISBN 3-9802768-7-2
- [17] BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (2011): Amtliche Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland. 2007-2010.
http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel/amtliche_mineraloeldaten/index.html. - 17.03.2011
- [18] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2011): Klimaschutzpolitik in Deutschland.
http://www.bmu.de/klimaschutz/nationale_klimapolitik/doc/5698.php. - 17.03.2011
- [19] BURGGRAF, J.; ULLRICH, K. (1995): Die neuen ölgekühlten ECO- Pflanzenölmotoren MF-RTA von DMS. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 56, Nr. 2, S. 101-103
- [20] BÜRGLER, L.; GLENSVIG, M.; NEUNTEUFL, K.; WEIßBÄCK, M. (2005): Fahrzeugapplikation mit alternativer Dieselerbrennung. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 66, Nr. 11, S. 866-871
- [21] CAPROTTI, R.; BREAKSPEAR, A.; GRAUPNER, O.; KLAUA, T.; KOHNEN, O. (2006): Diesel Injector Deposits Potential in Future Fueling Systems. SAE Technical Paper Series 2006-01-3359
- [22] CAPROTTI, R.; BREAKSPEAR, A.; GRAUPNER, O.; KLAUA, T. (2005): Detergency Requirements of Future Diesel Injection Systems. SAE Technical Paper Series 2005-01-3901
- [23] CAPROTTI, R.; BREAKSPEAR, A.; KLAUA, T.; WEILAND, P.; GRAUPNER, O.; BITTNER, M. (2007): RME Behaviour in Current and Future Diesel Fuel FIE's. SAE Technical Paper Series 2007-01-3982
- [24] CAPROTTI, R.; FOWLER, W. J.; LEPPERHOFF, G.; HOUBEN, M. (1993): Diesel Additive Technology Effects on Injector Hole Erosion/Corrosion, Injector Fouling and Particulate Traps. SAE Technical Paper Series 932739
- [25] CHENG, S. S.; KIM, C. (1990): Effect of Engine Operating Parameters on Engine Combustion Chamber Deposits. SAE Technical Paper Series 902108
- [26] CHENG, S. S. (1994): A Physical Mechanism for Deposit Formation in a Combustion Chamber. SAE Technical Paper Series 941892
- [27] CHENG, S. S. (2000): The Impacts of Engine Operating Conditions and Fuel Compositions on the Formation of Combustion Chamber Deposits. SAE Technical Paper Series 2000-01-2025
- [28] COVITCH, M. J.; GUNDIC, D. T.; GRAF, R. T. (1988): Microstructure of Carbonaceous Diesel Engine Piston Deposits. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 44, Nr. 2, S. 128-138
- [29] CZERWINSKI, J.; PETERMANN, J.-L.; ULRICH, A.; MUELLER, G.; WICHSER, A. (2005): Particulate Emissions of a TDI-Engine with different Lubrication Oils. SAE Technical Paper Series 2005-01-1100
- [30] DALY, D. T.; BANNON, S. A. (1994): Mechanism of Combustion Chamber Deposits. In: Proceedings of the 27th International Symposium for Automotive Technology and Automation (ISATA), 31.10.-03.11.1994, Aachen, ISBN: 0-947719-64-4, S. 501-507
- [31] DANESHGARI, P. (1988): Der Einfluß des Kraftstoffs auf die Einlassventilverkockung des Ottomotors. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau

- [32] DANIEL, K.; AARNINK, T. J.; GAIRING, M.; SCHMIDT, H. (2000): Combustion Chamber Deposits and Their Evaluation by a European Performance Test. SAE Technical Paper Series 2000-01-2023
- [33] DANIEL, K.; RENNER, G.; SEEHAUSEN, W. (1997): Ablagerungen auf der Reinfluftseite von Heavy Duty Dieselmotoren - Teste im Labor und im Motor. Mineralöltechnik, Vol. 33, Nr. 1, S. 42-65
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2004): DIN EN 14214: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Fettsäure-Methylester (FAME) für Dieselmotoren - Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2004): DIN EN 590: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Dieseldieselmotoren - Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2006): DIN V 51605: Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Rapsölkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [37] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2002): DIN ISO 3046: Hubkolben-Verbrennungsmotoren – Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [38] DIESEL, R. (1912): The Diesel-Oil Engine. Engineering, Nr. 93, S. 395-406
- [39] DÜRNBERGER, C.; FORMOWITZ, B.; GRIMM, H.; UHL, A. (2009): Experten-Delphi zur ethischen Bewertung von Energie aus Biomasse. Straubing, München: TFZ, Straubing; TTN, München
- [40] EGGERS, J.; GREVE, M.; WACHTMEISTER, G.; BIRNER, M. (2009): Zylinderdruckbasierte Verbrennungsregelung für die Serie. In: Proceedings 6th Dessau Gas Engine Conference. WTZ ROßLAU E. V. (Hrsg.)
- [41] EILTS, P. (1988): Zur Ablagerungsbildung im Schwachlastbetrieb hochaufgeladener Dieselmotoren. Dissertation, Technische Hochschule Düsseldorf
- [42] EMBERGER, P.; THUNEKE, K. (2006): Einhaltung aktueller Emissionsgrenzwerte bei zwei rapsölkraftstoffbetriebenen Traktoren - Erste Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen. In: Tagungsband zum 15. Symposium Bioenergie - Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) (HRSG.), OTTO e. V. Regensburg: Eigenverlag, S. 232-237
- [43] EOIL: Funktionsweise eoil. <http://www.eoil.de/eoil-system-plus/funktionsweise.html>. 30.07.2010
- [44] EUROPÄISCHES PARLAMENT (2003): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates - RL 2003/30/EG: Förderung zur Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor.
- [45] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) (2010): Standard-THG-Emissionen für Biokraftstoffe. http://www.nachwachsenderohstoffe.de/fileadmin/fnr/images/daten-und-fakten/2010/Abb72_2010_300dpi_rgb.jpg, 17.3.2011
- [46] FANG, H.; LANCE, M. (2004): Influence of Soot Surface Changes on DPF Regeneration. SAE Technical Paper Series 2004-01-3043
- [47] FAULSTICH, M.; FOTH, H.; CALLIES, C.; HOHMEYER, O.; HOLM-MÜLLER, K.; NIEKISCH, M.; SCHREURS, M. (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung - Sondergutachten. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Berlin
- [48] FAULSTICH, M.; GREIFF, K. (2007): Was kann die Biomasse in Deutschland leisten? In: Biomasse, Biogas, Biotreibstoffe... Fragen und Antworten. Verfahren & Werkstoffe für die Energietechnik, Band 3. FAULSTICH, M., PRECHTL, S. (Hrsg.), Sulzbach-Rosenberg: Förster Druck und Service GmbH, ISBN 978-3-9810391-2-2

- [49] FEHÉR, Z.; HERZOG, I.; PALOCZ-ANDRESEN, M.; WEBER, T. (2002): OBM und OBD - Vergleich bei der Ottomotorenteknik. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, Vol. 63, Nr. 12, S. 1062-1069
- [50] FORTNAGEL, M.; HERRBRICH, B. (1984): Effects of Fuel Stability upon Injection-Nozzle Deposit Formation in Road-Tested Diesel Engines. In: *Proceedings of the IMOG/NSG meeting*. Tampa, FL, USA, 15.05.1984, S. 82-88
- [51] FUENTES-AFFLICK, P. A.; PEYLA, R. J.; SENEGERS, H. P. M. (1997): Effects of Vehicle Design, Gasoline Composition, Driving Cycle, and Deposit Control Additives on Vehicle Performance. In: *Proceedings of the 5th symposium on the Performance Evaluation of Automotive Fuels and Lubricants*. Goteborg, S. 8-14
- [52] GAISER, G.; MUCHA, P. (2004): Prediction of Pressure Drop in Diesel Particulate Filters Considering Ash Deposit and Partial Regenerations. *SAE Technical Paper Series 2004-01-0158*
- [53] GAISER, G. (2005): Berechnung von Druckverlust, Ruß- und Ascheverteilung in Partikelfiltern. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, Vol. 66, Nr. 2, S. 92-102
- [54] GALLANT, T. R.; CUSANO, C. M.; GRAY, J. T.; STRETE, N. M. (1991): Cummins L10 Injector Depositing Test to Evaluate Diesel Fuel Quality. *SAE Technical Paper Series 912331*
- [55] GARDINER, D.; LAVIOLETTE, M.; ALLAN, W. D.; WANG, G.; BARDON, M. F. (2005): Detection of combustion chamber deposits in diesel engines through cylinder pressure and exhaust temperature measurements. In: *Proceedings of ICEF2005, ASME Internal Combustion Engine Division 2005 Fall Technical Conference*, S. 11-18
- [56] GAUPP, K. (1937): Pflanzenöle als Dieselmotorkraftstoffe. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 8, S. 203-207
- [57] GELLER, D. P.; GOODRUM, J. W.; CAMPBELL, C. C. (1999): Rapid Screening of Biologically Modified Vegetable Oil for Fuel Performance. *Transactions of the ASAE*, Vol. 41, Nr. 2, S. 277-282
- [58] GESKES, P.; EDWARDS, S.; IRMLER, K.; PFEFFER, J.; EMRICH, K. (2009): Weiterentwicklung von Abgaskühlern für zukünftige Anforderungen hinsichtlich Emissions- und Verbrauchsreduktion. In: *Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Schadstoffemission - 8. Dresdner Motorenkolloquium*. Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik - Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) (Hrsg.), S. 146-157
- [59] GIVENS, W. A.; BUCK, W. H.; JACKSON, A.; KALDOR, A.; HERTZBERG, A.; MOEHRMANN, W.; MUELLER-LUNZ, S.; PELZ, N.; WENNINGER, G. (2003): Lube Formulation Effects on Transfer of Elements to Exhaust After-Treatment System Components. *SAE Technical Paper Series 2003-01-3109*
- [60] GOODRUM, J. W.; PATEL, V. C.; MCCLENDON, R. W. (1996): Diesel injector carbonisation by three alternative fuels. *Transactions of The ASAE*, Vol. 39, Nr. 3, S. 817-821
- [61] GRAUER, A. (1999): Untersuchung des Abgasemissionsverhaltens von Kraftfahrzeugen mit einem On-Board-Meßsystem. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen. In: *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 12, Nr. 390. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3183390124
- [62] GRAUPNER, O.; KLAUA, T.; CAPROTTI, R.; BREAKSPEAR, A.; SCHIK, A.; ROUFF, C. (2005): Injector Deposit Test for Modern Diesel Engines. In: *Proceedings of the 5th International Colloquium "Fuels 2005"*, 12.-13.01.2005. BARTZ, W. J. (Hrsg.), Esslingen, ISBN 3-924813-59-0
- [63] GRÜTERING, U. F.; ROSEFORT, Y.; MAUERMAN, P.; PISCHINGER, S. (2007): Balancing of Engine Oil Components in a DI Diesel Engine with Exhaust Gas Aftertreatment. *SAE Technical Paper Series 2007-01-1923*

- [64] GÄRTNER, U.; KOCH, T.; DITTLER, A. (2009): Wohin mit der Asche? - Grundlagen der Partikelfiltertechnik im Nutzfahrzeug. In: Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Schadstoffemission - 8. Dresdner Motorenkolloquium. Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik - Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) (Hrsg.), S. 208-219
- [65] HADLER, J.; RUDOLPH, F.; DORENKAMP, R.; STEHR, H.; HILZENDEGER, J.; KRANZUSCH, S. (2008): Der neue 2,0-l-TDI-Motor von Volkswagen für niedrigste Abgasgrenzwerte - Teil 1. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 69, Nr. 5, S. 386-395
- [66] HADLER, J.; RUDOLPH, F.; DORENKAMP, R.; KÖSTERS, M.; MANNIGEL, D.; VELDTEN, B. (2008): Der neue 2,0-l-TDI-Motor von Volkswagen für niedrigste Abgasgrenzwerte - Teil 2. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 69, Nr. 6, S. 534-539
- [67] HAGE, F. (1985): Experimentelle Untersuchung der Einspritzduesenverkokung an einem PKW-Dieselmotor - Ursachen und Verbesserungsmöglichkeiten. Dissertation, Universität Hannover, Fakultät für Maschinenwesen
- [68] HANDELSHAUS RUNKEL: Pflanzenöl-Kraftstoff-Additiv DX52. <http://www.handelshaus-runkel.de/produkt-dx52.htm#dx52>. 27.02.2011
- [69] HARNDORF, H.; SCHÜMANN, U.; WICHMANN, V.; FINK, C. (2008): Motorprozessverhalten und Abgasemissionen alternativer Kraftstoffe im Vergleich mit Dieselmotor. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 69, Nr. 7-8, S. 640-646
- [70] HASSEL, E.; BERNDT, S.; GOLISCH, J.; HARKNER, W.; SCHÜMANN, U.; WICHMANN, V. (2004): Stand des "100-Traktoren-Programms" des BMVEL - Technische Ziele, Rahmenbedingungen und wissenschaftliche Begleitforschung. In: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger - wo liegen die Chancen für Biogas, Biokraftstoff, Biobrennstoff und Photovoltaik ; KTBL-Tagung vom 30. bis 31. März 2004 in Osnabrück. Münster-Hiltrup DÖHLER, H. (Hrsg.), ISBN 978-3-7843-2162-2, S. 7 S.
- [71] HASSEL, E.; WICHMANN, V. (2006): Ergebnisse des Demonstrationsvorhabens "Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsölauglichen Traktoren". <http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/biokraftstoffe/pdf/100traktoren/100traktorenErgebnisse.pdf>. 22.03.2006
- [72] HAVENITH, C. (1991): Emissionsverhalten von Nutzfahrzeugmotoren bei Verwendung von Pflanzenölen. In: VDI Berichte Nr. 885, S. 129-144
- [73] HAWTHRONE, M.; ANDRÉ, M. (2007): Characteristic Vehicle Operation for Fuel and Additive Test Development. In: Proceedings of the 6th International Colloquium "Fuels 2007", 10.-11.01.2007. BARTZ, W. J. (Hrsg.), Esslingen, ISBN 3-924813-67-1, S. 613-624
- [74] HENLE, A. (2006): Entkopplung von Gemischbildung und Verbrennung bei einem Dieselmotor. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen
- [75] HONKANEN, M. (2009): Einfluss von NExBTL HVO auf das Emissionsverhalten im Praxiseinsatz. In: Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Schadstoffemission - 8. Dresdner Motorenkolloquium. Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik - Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) (Hrsg.), S. 166-178
- [76] HOPP, M.; PRESCHER, K. (2003): Untersuchung der Strahlausbreitung bei gesteigerten Raildrücken von Common-Rail-Einspritzsystemen unter Einschluss von alternativen Kraftstoffen. In: Diesel- und Benzindirekteinspritzung II - Einspritzsysteme - Potenziale, Anwendungen, Zukunftsentwicklungen. TSCHÖKE, H. E. (Hrsg.), Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, ISBN 3-8169-2162-0, S. 93-103
- [77] HOPWOOD, A.B.; CHYNOWETH, S.; KALGHATGI, G.T. (1998): A Technique to Measure Thermal Difusivity and Thickness of Combustion Chamber Deposits In-Situ. SAE Technical Paper Series 982590

- [78] HOSHINO, K.; HIRATA, M.; KURIHARA, I.; TAKESHIMA, S. (2005): Effects of Engine Oil Composition on Diesel Particulate Filter. SAE Technical Paper Series 2005-08-0141
- [79] HUTCHINGS, M.; CHASAN, D.; BURKE, R.; ODORISO, P.; ROVANI, M.; WANG, W. (1997): Heavy Duty Diesel Deposit Control. Prevention as a Cure. SAE Technical Paper Series 972954
- [80] ISHII, H.; EMI, M.; YAMADA, Y.; SHIMANO, K.; ENOMOTO, Y.; KIMURA, S. (2001): Heat Loss to The Combustion Chamber Wall with Deposit Adhering to The Wall Surface in D.I. Diesel Engine First Report: Influence of Deposit on Instantaneous Heat Flux into the Piston Surfaces. SAE Technical Paper Series 2001-01-1811
- [81] JESCHKE, J. (2002): Konzeption und Erprobung eines zylinderdruckbasierten Motormanagements für PKW-Dieselmotoren. Dissertation, Otto-von-Guerike-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau
- [82] JONKERS, R. K.; BARDON, M. F.; GARDINER, D. P. (2002): Techniques for Predicting Combustion Chamber Deposits in a Direct Injection Diesel Engine. SAE Technical Paper Series 2002-01-2673
- [83] JURISCH, C.; MEYER-PITTRUFF, R. (1994): Pflanzenölgeeignete Dieselmotoren deutscher Hersteller. In: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke. VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.). Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, S. 89-105
- [84] KALGHATGI, G. T.; MCDONALD, C. R.; HOPWOOD, A. B. (1995): An Experimental Study of Combustion Chamber Deposits and Their Effect in a Spark-Ignition Engine. SAE Technical Paper Series 950680
- [85] KALGHATGI, G. T.; PRICE, R. J. (2000): Combustion Chamber Deposit Flaking. SAE Technical Paper Series 2000-01-2858
- [86] KERN, C.; WIDMANN, B.; SCHÖN, H.; MAURER, K.; WILHARM, T. (1997): Standardisierung von Rapsöl. Landtechnik, Vol. 52, Nr. 2, S. 68-69
- [87] KERN, C.; WIDMANN, B. A. (1997): Bewertung der Emissionen von Dieselmotoren beim Betrieb mit Kraftstoffen auf Pflanzenölbasis und normalem Dieselkraftstoff - Datenauswertung der bisherigen Labor- und Flottenversuche. Abschlussbericht für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen
- [88] KIM, C.; CHENG, S. S.; MAJORSKI, S. A. (1991): Engine Combustion Chamber Deposits: Fuel Effects and Mechanisms of Formation. SAE Technical Paper Series 912379
- [89] KIM, J.; MIN, B.; LEE, D.; OH, D.; CHOI, J. (1998): The Characteristics of Carbon Deposit Formation in Piston Top Ring Groove of 10 Gasoline and Diesel Engines. SAE Technical Paper Series 980526
- [90] KIMMICH, F.; ISERMANN, R. (2002): Model Based Injection Mass Supervision for Diesel Engines using a Fast Broadband Oxygen Sensor. SAE Technical Paper Series 2002-01-0846
- [91] KITTLESON, D. B.; AMBS, J. L.; HADJKACEM, H. (1990): Particulate Emissions from Diesel Engines: Influence of In-cylinder Surface. SAE Technical Paper Series 900645
- [92] KOCH, H.-J.; FOTH, H.; FAULSTICH, M.; VON HAAREN, C.; JÄNICKE, M.; MICHAELIS, P.; OTT, K. (2007): Klimaschutz durch Biomasse - Sondergutachten. Berlin: Schmidt. ISBN 978-3-503-10602-8
- [93] KONSTANDOPOULOS, A.G.; ZARVALIS, D.; KLADOPOULOU, E.; DOLIOS, L. (2006): A Multi-Reactor Assembly for Screening of Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper Series 2006-01-0874
- [94] KORUS, R. A.; HO, J.; PETERSON, C. L. (1987): A Rapid Engine Test to Measure Injector Fouling in Diesel Engines Using Vegetable Oil Fuels. Journal of American Oil Chemistry Society, Vol. 62, Nr. 11, S. 1563-1564

- [95] KOZUCH, P. (2004): Ein phänomenologisches Modell zur kombinierten Stickoxid- und Rußberechnung bei direkteinspritzenden Dieselmotoren. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
- [96] KRAUSE, H.-H. (2005): Neue Erkenntnisse in der Einspritzung unterschiedlicher Kraftstoffe. Vortrag Clean Energy Power, 29.01.05, Berlin.
- [97] KRUPPKE, E. (1959): Zur Bewertung von Motorenöl (Bewertung von Prüfkolben). Erdöl und Kohle, Vol. 12, Nr. 6
- [98] KURIHARA, I.; TAKESHIMA, S.; HIROSHI, Y. (2004): Development of Low-Ash Type, Heavy Duty Diesel Engine Oil for After-Treatment Devices. SAE Technical Paper Series 2004-01-1955
- [99] KÖHLER, E.; FLIERL, R. (2009): Verbrennungsmotoren, 5. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, ISBN 978-3-8348-0490-7
- [100] LEEDHAM, A.; CAPROTTI, R.; GRAUPNER, O.; KLAUA, T. (2004): Impact of Fuel Additives on Diesel Injector Deposits. SAE Technical Paper Series 2004-01-2935
- [101] LEHMANN, U.; SCHOLZ, J.; GOLLER, J. (2005): Festigkeits- und Schwingungsberechnung. In: Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. VAN BASSHUYSEN, R. (Hrsg.), Wiesbaden: Vieweg, ISBN 3-528-23933-6, S. 847
- [102] LEONHARDT, H. (1986): Chemische Untersuchungen zur Zusammensetzung und zum Mechanismus der Ablagerungsbildung auf den Einlassventilen von Ottomotoren. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
- [103] LEPPERHOFF, G.; HOUBEN, M. (1993): Mechanisms of Deposit Formation in Internal Combustion Engines and Heat Exchangers. SAE Technical Paper Series 931032
- [104] LEPPERHOFF, G.; HÜTHWOHL, G.; LI, Q. (1995): Mechanismen zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern durch Kraftstoffadditive. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 56, Nr. 1, S. 28-32
- [105] LEPPERHOFF, G.; LÜTKEMEYER, G.; SCHÖNHERR, C.; CASSIDY, L.; BLOCK, D. (1991): Ablagerungsbildung und ORI eines Renault R 19 im Feld. Mineralöltechnik Nr. 8, S. 1-16
- [106] LEPPERHOFF, G.; SCHOMMERS, J.; WEBER, O.; LEONHARDT, H. (1987): Mechanism of the Deposit Formation on Inlet Valves. SAE Technical Paper Series 872115
- [107] LINKE, A.; LUDWIG, F. (1991): Handbuch Ventile, Ventilkegelstücke, Ventildrehvorrichtungen. 7. Aufl. TRW Deutschland GmbH
- [108] LÜKE, H.-W. (2005): BTL-Kraftstoffe - eine vielversprechende Option für die Zukunft. Erdöl Erdgas Kohle, Vol. 121, Nr. 1, S. 3-5
- [109] MACAUDIERE, P.; ROCHER, L.; NASCHKE, W. (2004): Dieselpartikelfilter in Kombination mit kraftstoffgelöstem Katalysator. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 65, Nr. 4, S. 286-290
- [110] MANNI, M.; PEDICILLO, A.; BAZZANO, F. (2006): A Study of Lubricating Oil Impact on Diesel Particulate Filters by Means of Accelerated Engine Tests. SAE Technical Paper Series 2006-01-3416
- [111] MANNI, M.; PEDICILLO, A.; DEL PIERO, G.; PREVINDE MASSARA, E. (2007): An Experimental Evaluation of the Impact of Lubricating Oils and Fuels on Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper Series 2007-01-1925
- [112] MASOUDI, M. (2005): Pressure Drop of Segmented Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper Series 2005-01-0971

- [113] MAURER, K. (2003): Motorprüflauf mit Rapsöl-Diesel-Mischungen. Schlussbericht für Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow, Förderkennzeichen: FNR 220268000
- [114] MAURER, K. (2000): Untersuchung zur Produktion von standardisiertem Pflanzenöl-Treibstoff und Entwicklung von motor- und verbrennungstechnischen Kenndaten bei auf pflanzenölbetrieb umgerüsteten Dieselmotoren. Kurzbericht zum Teilprojekt „Naturdiesel“. Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim (Hrsg.), Eigenverlag, 102 S.
- [115] MCDONNELL, K. P.; WARD, S. M.; McNULTY, P. B. (1997): Accelerated Injector Fouling Using Rapeseed Oil/Diesel Blends in a Direct Injection Engine. Transactions of the ASAE, Vol. 41, Nr. 2, S. 277-282
- [116] MCGEEHAN, J. A.; FONTANA, B. J. (1980): Effect of Soot on Piston Deposits and Crankcase Oils - Infrared Spectrometric Technique for Analyzing Soot. SAE Technical Paper Series 801368
- [117] MCGEEHAN, J. A.; FONTANA, B. J.; KRAMER, J. D. (1982): The Effects of Piston Temperature and Fuel Sulfur on Diesel Engine Piston Deposits. SAE Technical Paper Series 821216
- [118] MENDOZA, M. C.; ZHANG, Q.; HANSEN, A. C.; REID, J. F. (2001): Injector Nozzle Cocking With Oxygenated Diesel. SAE Technical Paper Series 2001-01-2016
- [119] MOHR, U.: Kolben/Kolbenbolzen/Kolbenbolzensicherung. In: Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. VAN BASSHUYSEN, R. (Hrsg.): Wiesbaden: Vieweg, ISBN 3-528-23933-6, S. 88
- [120] MOLLENHAUER, K. (1997): Handbuch Dieselmotoren. Berlin: Springer-Verlag, ISBN 3-540-62514-3
- [121] MOORE, S. M.; SABOURIN, E. T.; YEH, S. W. (1997): The Effects of Engine Operating Temperature on CCD Surface Chemistry and Morphology. In: Proceedings of the 1st International Colloquium "Fuels 1997", 16.-17.01.1997. BARTZ, W. J. (Hrsg.), Esslingen, ISBN 978-3924813369, S. 73-88
- [122] MÖLLER, U. J.; NASSAR, J. (2002): Schmierstoffe im Betrieb, 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, ISBN 3-540-41909-8
- [123] NAKIC, D. J.; ASSANIS, D. N.; WHITE, R. A. (1994): Effect of Elevated Piston Temperature on Combustion Chamber Deposit Growth. SAE Technical Paper Series 940948
- [124] NEMOTO, S., KISHI, Y., MATSUURA, K., MIURA, M., TOGAWA, S.; ISHIKAWA, T.; HASHIMOTO, T.; YAMAZAKI, T. (2004): Impact of Oil-derived Ash on Continuous Regeneration-type Diesel Particulate Filter – JCAPII Oil WG Report. SAE Technical Paper Series 2004-01-1887
- [125] NISHIWAKI, K.; HAFNAN, M. (2000): The Determination of Thermal Properties of Engine Combustion Chamber Deposits. SAE Technical Paper Series 2000-01-1215
- [126] NUSZKOWSKI, J.; THOMPSON, G. J.; MOLES, N.; CHIARAMONTE, M.; HU, J. (2006): Pressure Drop and Cleaning of In-Use Ash Loaded Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper Series 2006-01-3256
- [127] OGYU, K.; OHNO, K.; HONG, S.; KOMORI, T. (2004): Ash Storage Capacity Enhancement of Diesel Particulate Filter. SAE Technical Paper Series 2004-01-0949
- [128] OLSEN, R. E.; INGHAM, M. C.; PARSONS, G. M. (1984): A Fuel Additive Concentrate for Removal of Injector Deposits in Light Duty Engines. SAE Technical Paper Series 841349
- [129] PALOCZ-ANDRESEN, M. (2009): Erfahrungen mit der On-Board-Messtechnik im Feldeinsatz. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 70, Nr. 7-8, S. 548-552

- [130] PANESAR, A.; MARTENS, A.; JANSEN, L.; LAL, S.; RAY, D.; TWILLEY, M. (2000): Development of a New Peugeot XUD9 10 Hour Cyclic Test to Evaluate the Nozzle Coking Propensity of Diesel Fuels. SAE Technical Paper Series 2000-01-1921
- [131] PAPKE, B. L. (1992): High Temperature Diesel Piston Deposit Formation: Wetting and Adhesion Phenomenon. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Nr. 48, S. 209-218
- [132] PAYRI, F.; PAYRI, R.; SALVADOR, F. J.; GIMENO, J. (2005): Comparison between Different Hole to Hole Measurement Techniques in a Diesel Injection Nozzle. SAE Technical Paper Series 2005-01-2094
- [133] PERKINS, L. A.; PETERSON, C. L.; AULD, D. L. (1991): Durability Testing of Transesterified Winter Rape Oil (*Brassica Napus L.*) as Fuel in Small Bore, Multi-Cylinder, DI, CI Engines. SAE Technical Paper Series 911764
- [134] PETERSON, C. L.; AULD, D. L.; KORUS, R. A. (1983): Winter Rape Oil Fuel for Diesel Engines - Recovery and Utilization. Journal of the American Oil Chemists Society, Vol. 60, Nr. 8, S. 1579-1587
- [135] PETERSON, C. L.; KORUS, R. A.; MARA, P. G.; MADSEN, J. P. (1987): Fumigation with propane and transesterification effects on injector fouling with vegetable oil fuels. Transactions of the ASAE, Vol. 30, Nr. 1, S. 28-35
- [136] PIESCHE, M.; BARGENDE, M.; DEUSCHLE, T.; HITZLER, G.; JANOSKE, U.; WEIK, W. (2003): Langzeitstabilität von Partikelfiltern in Dieselmotoren. In: Proceedings - FVV Informationstagung Motoren 2003, FVV-Vorhaben Nr. 067761, Heft R 521
- [137] PRYDE, E. H. (1982): Vegetable Oil Fuel Standards. In: Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels. St. Joseph, Mich., American Society of Agricultural Engineers (Hrsg.), S. 101-105
- [138] PUDEL, F. (1994): Entwicklungsprojekte der ÖHMI Forschung und Ingenieurtechnik GmbH. In: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke - Nutzen, Kosten, Perspektiven; Tagung Würzburg, 4. und 5. Juli 1994. Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Düsseldorf: VDI-Verl, ISBN 3-18-091126-3
- [139] QUIGLEY, R.; BARBOUR, R.; PANESAR, A.; ARTERS, D. V. (2009): A Review of Fuel and Additive Performance in the New CEC F-98-09 DW10 Injector Fouling Test. In: Proceedings of the 7th International Colloquium "Fuels 2009", 14.-15.01.2009. BARTZ, W. J. (Hrsg.), Esslingen, ISBN 3-924813-75-2, S.
- [140] RA, Y.; REITZ, R. D.; JARRETT, M. W.; SHYU, T. P. (2006): Effects of Piston Crevice Flows and Lubricant Oil Vaporization on Diesel Engine Deposits. SAE Technical Paper Series 2006-01-1149
- [141] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANKL, H.; BREINESBERGER, J. (2009): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. Endbericht BMLFUW-LE.1.3.2/0037-II/1/2006. FJ-BLT Wieselburg
- [142] REID, J. F.; HANSEN, A. C.; GOERING, C. E. (1989): Quantifying Diesel Injector Cooking with Computer Vision. Transactions of the ASAE, Vol. 32, Nr. 5, S. 1503-1506
- [143] REMMELE, E.; STOTZ, K.; WITZELSBERGER, J.; GASSNER, T. (2007): Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich - Berichte aus dem TFZ - 12, Straubing: Technologie- und Förderzentrum, ISSN 1614-1008
- [144] REMMELE, E.; THUNEKE, K.; WIDMANN, B.; WILHARM, T.; SCHÖN, H. (2000): Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW - Gelbes Heft Nr. 69. München
- [145] REMMELE, E. (2005): Erfahrung mit bisheriger Qualitätsprüfung und Stand der Normung von Rapsölkraftstoff. In: Tagungsband zum 1. Deutschen Pflanzenöl Energieforum (DPE) - Clean Energy Power, 26.-27.01.2005, Berlin

- [146] REMMELE, E. (2007): Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, ISBN 978-3-9803927-1-6
- [147] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff – Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. In: Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG). Gießen
- [148] RICHTER, H.; HEMMERLEIN, N.; KORTE, V. (1991): Einsatz von Rapsöl als Alternativkraftstoff für Dieselmotoren. In: Tagungsband zur AVL-Konferenz Motor und Umwelt: Mit welchem Kraftstoff in die Zukunft?. Graz, S. 297-305
- [149] RICHTER, H.; KORTE, V.; HEMMERLEIN, N. (1991): Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren. Forschungsbereich: Dr.-Ing. hc F. Porsche AG, Entwicklungszentrum Weissach, 113 S.
- [150] RICHTER, H. (1994): Untersuchungen im Hause Porsche mit Rapsöl und Rapsmethylester. Fachgespräch Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11.01.1994, Hrsg. CARMEN e.V., Rimpar
- [151] ROTHENWÖHRER, M. (2004): Einfluss thermodynamisch metastabiler Zustände auf den Zerfall und das Mischungsverhalten von Flüssigkeitsstrahlen. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen
- [152] RUPP, M. (1990): Verarbeitung von Rapsöl in Mineralö Raffinerien. In: Energie aus nachwachsenden Rohstoffen und organischen Reststoffen - Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Tagung Darmstadt, 8. März 1990. Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.), Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-18-090794-0, S. 97-111
- [153] RÜDINGER, V. (1975): Kraftstoffseitige Einflüsse auf Kolbenablagerungen und Schmierölveränderungen in Verbrennungsmotoren. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 36, Nr. 3, S. 63-68
- [154] SAME DEUTZ-FAHR (2008): DEUTZ-FAHR „Agrotron NaturalPower“ – Der erste Traktor, der mit rohem Rapsöl betrieben wird. Pressemitteilung. <http://www.deutz-fahr.com/germany/1427.pdf> - 13.01.2009
- [155] SAPPOK, A. G.; WONG, V. W. (2007): Detailed Chemical and Physical Characterization of Ash Species in Diesel Exhaust Entering Aftertreatment Systems. SAE Technical Paper Series 2007-01-0318
- [156] SCHLÖGL, H., RAMMER, F.; RICHTER, K. (1993): Optimierung der Motorenschmierung zur Erfüllung der Abgasgrenzwerte bei Nutzfahrzeugen. In: 14. Internationales Wiener Motorensymposium - 6. - 7. Mai 1993. LENZ, H. P. (Hrsg.), Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-18-148212-9, S. 200-230
- [157] SCHMIDT, M.; KIMMICH, F.; STRAKY, H.; ISERMANN, R. (2000): Combustion Supervision by Evaluating the Crankshaft Speed and Acceleration. SAE Technical Paper Series 2000-01-0558
- [158] SCHOMMERS, J. (1986): Ursachen der Ablagerungsbildung auf den Einlassventilen von Verbrennungsmotoren. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen
- [159] SCHREINER, K. (1999): Motordiagnose bei Hochleistungs-Dieselmotoren. In: Tagungsband 7. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, 17.-18.10.1999, Graz.
- [160] SCHWARTE, A.; KIMMICH, F.; ISERMANN, R. (2002): Modellbasierte Fehlererkennung und -diagnose für Dieselmotoren. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 63, Nr. 7-8, S. 2-10
- [161] SEM, T. R. (2004): Effect of Various Lubricating Oils on Piston Deposits in Biodiesel Fueled Engines. SAE Technical Paper Series 2004-01-0098

- [162] SENIGERS, H. P. M.; OLSEN, R. E.: Performance Tests for Diesel Injector Fouling, Fuel Foaming, and Related Functional Benefits. In: Proceedings of the 1st International Colloquium "Fuels 1997", 16.-17.01.1997. BARTZ, W. J. (Hrsg.), Esslingen, ISBN 978-3924813369, S. 57-69
- [163] SHIH, L. K.-L. (1998): Study of the Relationship Between Diesel Engine Emissions and the Formation and Contents of Deposit. SAE Technical Paper Series 981425
- [164] SPICHER, U.; LÜFT, M. (2007): Optimierung der Kraftstoffstrahlausbreitung für Pflanzenöl, insbesondere natürliches Rapsöl, bei der Verwendung moderner Diesel-Einspritzsysteme. Abschlussbericht Forschungsvorhaben BWK 25002
- [165] STARKE, K.; SCHWARZ, E.: Einfluss von Kraftstoffkomponenten und speziellen Additiven auf Ablagerungen in Einlasssystemen von Ottomotoren. In: Mineralöltechnik (1982) S. 1-12
- [166] STARKE, K.: Ablagerungen in Ansaugsystemen von Ottomotoren. In: Mineralöltechnik (1977) S. 1-17
- [167] STECHER, G. (1981): Vegetable Oils as Diesel Fuel. In: Proceedings of the 14th International Congress on Combustion Engines. Helsinki. S. 1-14
- [168] STEIGERT, S.; WELTENS, H. (2007): Advantages of Sintered Metal Filters compared to Ceramic based Filters. Firmenpräsentation HJS Fahrzeugtechnik GmbH. 06.12.2007
- [169] SUTTON, M.; BRITTON, N.; OTTERHOLM, B.; TENGSTROM, P.; FRENNEFELT, C.; WALKER, A.; MURRAY, I. (2004): Investigations into Lubricant Blocking of Diesel Particulate Filters. In: SAE Technical Paper Series 2004-01-3013
- [170] TAKEUCHI, Y.; HIRANO, S.; KANAUCHI, M.; OHKUBO, H.; NAKAZATO, M.; SUTHERLAND, M.; VAN DAM, W. (2003): The Impact of Diesel Engine Lubricants on Deposit Formation in Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper Series 2003
- [171] TANG, J.; PISCHINGER, S.; GRÜTERING, U.; KECK, J. (2008): Einflüsse auf die Belagsbildung bei Einspritzdüsen von Dieselmotoren mit Direkteinspritzung. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 69, Nr. 9, S. 754-761
- [172] THE WORLD BANK (2008): World Development Report 2008: Agriculture for Development. ISBN 978-0-8213-7297-5
- [173] THRÄN, D.; WITT, J.; HENNING, C. (2009): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Zwischenbericht „Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse 2008“, Leipzig: Deutsches Biomasse Forschungszentrum gGmbH
- [174] THUNEKE, K.; LINK, H.; WIDMANN, B.; REMMELE, E. (2002): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Abschlussbericht. In: Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern, Nr. 175. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) (Hrsg.), München
- [175] THUNEKE, K.; REMMELE, E.; WIDMANN, B. (2002): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Leitfaden In: Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern, Nr. 170. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) (Hrsg.), München
- [176] THUNEKE, K.; WILHARM, T.; STOTZ, K. (2005): Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl im Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren. Berichte aus dem TFZ – 7, Straubing: Technologie- und Förderzentrum, ISSN 1614-1008
- [177] THUNEKE, K. (2008): Untersuchungen zu Abgasemissionen und zum Einsatz von Partikelfiltern bei rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

- [178] TREE, D. R.; DEC, J. E. (2001): Extinction Measurements of In-Cylinder Soot Deposition in a Heavy-Duty DI Diesel Engine. SAE Technical Paper Series 2001-01-1296
- [179] TSCHÖKE, H. (1997): Rapsöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren - Chance oder Irrweg?. In: Proceedings of the 1st International Colloquium "Fuels 1997", 16.-17.01.1997. BARTZ, W. J. (Hrsg.), Esslingen, ISBN 978-3924813369, S. 405-420
- [180] ULLMANN, J.; GEDULDIG, M.; STUTZENBERGER, H.; CAPROTTI, R.; BALFOUR, G. (2008): Investigation into the Formation and Prevention of Internal Diesel Injector Deposits. SAE Technical Paper Series 2008-01-0926
- [181] ULLMANN, J.; WINTER J. (2007): Assessment of Injector Coking by Biodiesel Blends B5 and B10 - Engine Test Results. Projektvortrag DGMK Projects 639/1+2, 13.09.2007, Berlin
- [182] UMWELTBUNDESAMT: Energieeffizienz bei der Stromerzeugung.
<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2849>. - 17.03.2011
- [183] UNITED NATIONS: United Nations Framework Convention on Climate Change: Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.
<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/protodt.pdf>. - 17.03.2011
- [184] VELLGUTH, G. (1983): Performance of Vegetable Oils and their Monoesters as Fuels for Diesel Engines. SAE Technical Paper Series 831358
- [185] WATSON, S. A. G.; HUANG, W.; WONG, V. W. (2007): Correlations among Ash-Related Oil Species in the Power Cylinder, Crankcase and the Exhaust System of a Heavy-Duty Diesel Engine. SAE Technical Paper Series 2007-01-1965
- [186] WICHMANN, V. (2007): Rapsölmrüstungen an Dieselmotoren - Notwendigkeit und deren Umsetzung. In: Erster Internationaler Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen. Erfurt. nova-Institut GmbH (Hrsg.), ISBN 13987-3-9805840-8-1, S. 227-236
- [187] WIDMANN, B.; REMMELE, E. (2008): Biokraftstoffe - Fragen und Antworten. Positionspapier. Straubing: Technologie- und Förderzentrum
http://www.tfz.bayern.de/sonstiges/16411/positionspapier_080530.pdf - 10.10.2008
- [188] WIDMANN, B.; STELZER, T.; REMMELE, E.; KALTSCHMITT, M. (2001): Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen. In: Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (Hrsg.), Berlin: Springer-Verlag, S. 537-583
- [189] WIDMANN, B. A. (1994): Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Minderung des Phosphorgehalts von Rapsöl bei der Gewinnung in dezentralen Anlagen. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Landtechnik
- [190] WILHARM, T. (2007): Pflanzenölkraftstoff: Qualitätssicherung anhand der Norm DIN V 51605. In: Erster Internationaler Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen. Erfurt. nova-Institut GmbH (Hrsg.), ISBN 13987-3-9805840-8-1, S. 125-134
- [191] WITZELSBERGER, J.; REMMELE, E. (2008): Nachbehandlung von Rapsölkraftstoff dezentraler Ölmühlen zur Minderung von Elementgehalten. Landtechnik, Vol. 63, Nr. 4, S. 205-207
- [192] WITZELSPERGER, J.; REMMELE, E. (2009): Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion abgelagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung. Berichte aus dem TFZ – 20, Straubing: Technologie- und Förderzentrum, ISSN 1614-1008
- [193] WOSCHNI, G.; HUBER, K. (1991): The Influence of Soot Deposits on Combustion Chamber Walls on Heat Losses in Diesel Engines. SAE Technical Paper Series 910297

- [194] WÖRGETTER, M. (2006): Local and innovative biodiesel. Abschlussbericht ALTENER project No. 4.1030/C/02-22, FJ-BLT Wieselburg. ISBN 3-902451-02-5
- [195] YONEKAWA, T. (1984): Analysis of Driveability on Diesel Vehicles. SAE Technical Paper Series 840257
- [196] YOUNG, D.M.; HICKMAN, D.L.; BHATIA, G.; GUNASEKARAN, N. (2004): Ash Storage Concept for Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper Series 2004-01-0948
- [197] ZIEJEWSKI, M.; GOETTLER, H. J. (1988): Effect of Lacquer Deposits from Sunflower Oil on Injection Needle Mobility for Different Needle Guide Clearances. SAE Technical Paper Series 881336
- [198] Zikoridse, G. (2007): Abgasnachbehandlung bei pflanzenöлтаuglichen Motoren. In: Erster Internationaler Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen. Erfurt. nova-Institut GmbH (Hrsg.), ISBN 13987-3-9805840-8-1, S. 237-248

Anhang A: Messtechnik des BHKW-Prüfstands

Messdatenerfassung „MSR2“

Messgröße	Sensortyp	Anmerkungen
Drehzahl	Bosch 0192 114 007	
Generatorleistung		berechnet aus Generatorstrom und Generatorspannung
Kühlwassereintrittstemperatur	NTC	
Kühlwasseraustrittstemperatur	NTC	
Kurbelhausdruck	Motorola MPXV7007DP	Relativdruckmessung zum Umgebungsdruck
Abgasgegendruck Motorausstritt	Bosch DS-D2	Relativdruckmessung zum Umgebungsdruck
Differenzdruck über DPF und Abgaswärmetauscher	Bosch DS-D2	
Schmieröltemperatur	PT 500	
Kraftstofftemperatur	PT 500	
Abgastemperatur	NiCr-Ni	ersetzt Abgastemperaturfühler der Serienanlage
Raumtemperatur	PT 500	
Saugrohrtemperatur	PT 500	
Abgastemperatur nach DPF und Abgaswärmetauscher	PT 500	
Position ESP-Regelstange	Novotechnik TEX 0025 521 002 202	selbst entwickelte Messtechnik
Kraftstoffverbrauch	Krohne Optimass 7100	Coriolis-Massenstrommessung mit konstantem Vordruck
Umgebungsdruck		Absolutmessung

Indiziersystem „AVL 619 Indimeter“

Messgröße	Sensortyp	Anmerkungen
Kurbelwinkel	AVL 360 C AVL 3501	Impulsvervielfacher
Zylinderdruck	Kistler 6052AU20 Kistler 5001	Ladungsverstärker
Einspritzleitungsdruck	Kistler 4067A1000	Messkette inklusive Verstärker
Nadelhub Einspritzdüse	Wolff ASM 470 002-2 Corrsys Datron IPD	Ladungsverstärker

Emissionsmessanlage „Semtech-D“

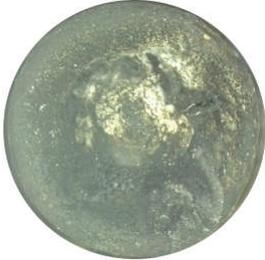
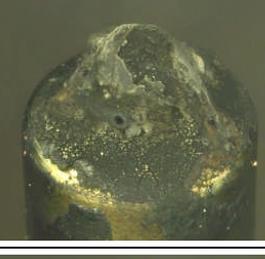
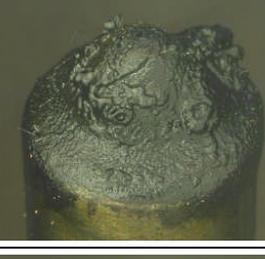
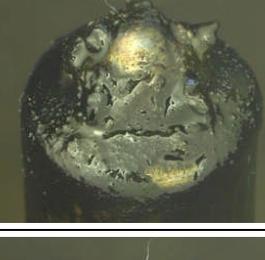
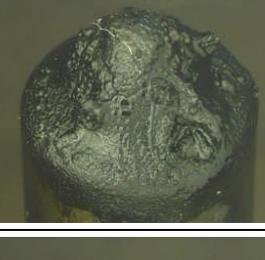
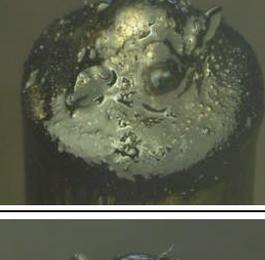
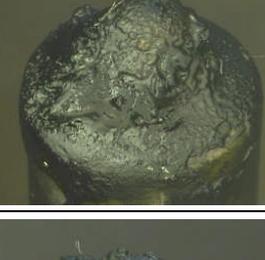
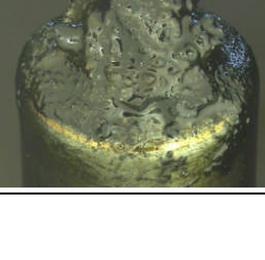
Messgröße	Analysatortyp bzw. Sensortyp	Anmerkungen
CO	nicht-dispersiv Infrarot (NDIR)	gemeinsame Messzelle für CO und CO ₂
THC	Flammen-Ionisations-Detektor (FID)	
NO	nicht-Dispersiv Ultra-Violett (NDUV)	gemeinsame Messzelle für NO und NO ₂
NO ₂	nicht-Dispersiv Ultra-Violett (NDUV)	gemeinsame Messzelle für NO und NO ₂
CO ₂	nicht-dispersiv Infrarot (NDIR)	gemeinsame Messzelle für CO und CO ₂
O ₂	Elektrochemische Messzelle	
Temperatur	Vaisala HMP 45A	
Luftdruck	Absolutdrucksensor	in Emissionsmessgerät integriert
rel. Feuchte	Vaisala HMP 45A	

sonstige Messwerte

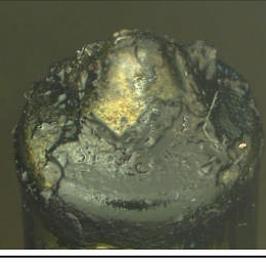
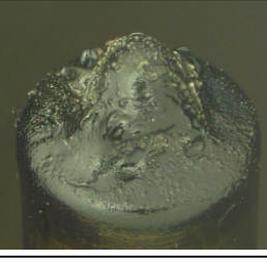
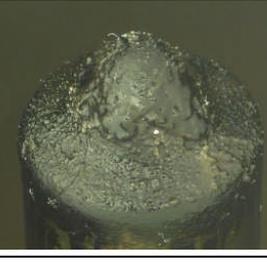
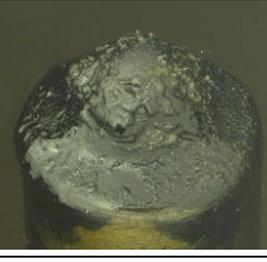
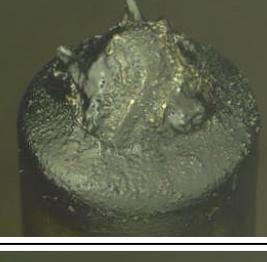
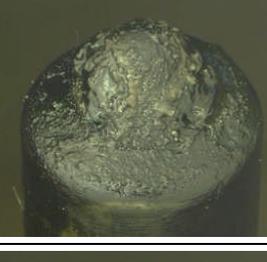
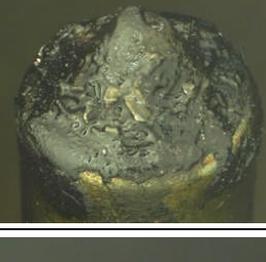
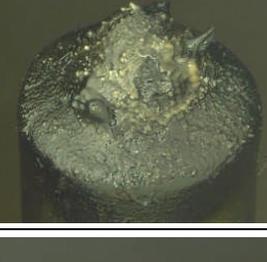
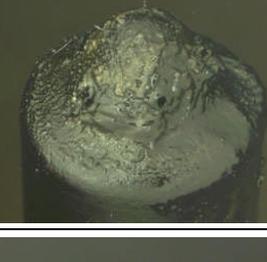
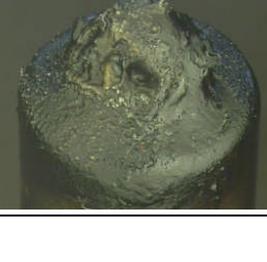
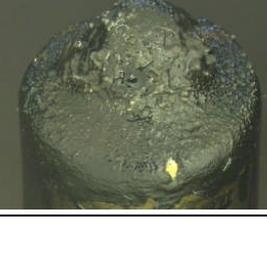
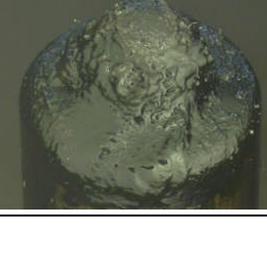
Messgröße	Messsystem	Anmerkungen
Blow-By-Volumenstrom	Rotameter	händisch aufgenommen
Schmierölstand	Ölmessstab	SenerTec 4766-038-000
Masse DPF	Kern KB 10000-1	händisch aufgenommen
Temperatur Einspritzdüsen spitze	NiCr-Ni	Mess-DHK „Bosch“ und Mess-DHK „FEV“
Temperatur Einspritzdüsen schaft	NiCr-Ni	nur Mess-DHK „FEV“

Anhang B: Detailaufnahmen der Einspritzdüsen

BHKW 1	RÖK 1 P < 0,5 mg/kg; Ca + Mg < 0,5 mg/kg		RÖK 2 P = 9,5 mg/kg; Ca+ Mg = 12,1 mg/kg	
	Dauerlauf	Takt 1/1	Dauerlauf	Takt 1/1
„von vorne“				
„von innen“				
„Einlass“				
„unten“				
„Auslass“				
„oben“				

BHKW 1	RÖK 3 P = 14,5 mg/kg; Ca + Mg = 15,0 mg/kg		RÖK 4 P = 23,0 mg/kg; Ca + Mg = 20,5 mg/kg	
	Dauerlauf	Takt 1/1	Dauerlauf	Takt 1/1
„von vorne“				
„von innen“				
„Einlass“				
„unten“				
„Auslass“				
„oben“				

BHKW 2	RÖK 1 P < 0,5 mg/kg; Ca + Mg < 0,5 mg/kg		RÖK 2 P = 9,5 mg/kg; Ca+ Mg = 12,1 mg/kg	
	Dauerlauf	Takt 1/1	Dauerlauf	Takt 1/1
„von vorne“				
„von innen“				
„Einlass“				
„unten“				
„Auslass“				
„oben“				

BHKW 2	RÖK 3 P = 14,5 mg/kg; Ca + Mg = 15,0 mg/kg		RÖK 4 P = 23,0 mg/kg; Ca+ Mg = 20,5 mg/kg	
	Dauerlauf	Takt 1/1	Dauerlauf	Takt 1/1
„von vorne“				
„von innen“				
„Einlass“				
„unten“				
„Auslass“				
„oben“				

Anhang C: Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Standard-THG-Emissionen für Biokraftstoffe [45].....	6
Abbildung 2:	Verbrauch an Pflanzenölkraftstoffen in Deutschland [17].....	9
Abbildung 3:	Verteilung der Anlagenbaujahre von 90 Pflanzenöl-BHKW (Betreiberbefragung durch DBFZ) [173]	9
Abbildung 4:	Ölsaatenverarbeitung in (zentralen) industriellen Ölmühlen [146].....	10
Abbildung 5:	Ölsaatenverarbeitung in (dezentralen) Kleinanlagen [146]	11
Abbildung 6:	Sequentielle Darstellung der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung [120].....	12
Abbildung 7:	Typischer Aufbau eines Triglycerids [176].....	13
Abbildung 8:	Korrelation zwischen Calciumgehalt und Phosphorgehalt von Rapsölproben [145].....	18
Abbildung 9:	Einordnung von pflanzenöлтаuglichen Motoren nach dem Kraftstoffsystem [145].....	19
Abbildung 10:	Modell der Ablagerungsbildung nach Lepperhoff (nachgebaut) [106]	26
Abbildung 11:	Einfluss der Kühlwassertemperatur auf die Ablagerungsbildung [103].....	28
Abbildung 12:	Modellvorstellung für das Ablagerungsverhalten von Ruß [58]	29
Abbildung 13:	Verlauf von Ablagerungsmasse, Ablagerungsschichtdicke und rel. Wärmeleitfähigkeit während des Ablagerungsaufbaus [103]	30
Abbildung 14:	Isothermen bei Vollast und Nennleistung am Kolben eines Nkw-DI- Dieselmotors [99]	35
Abbildung 15:	Temperaturverteilung an einem Kolben mit Kühlkanal für einen Diesel- Motor [119].....	35
Abbildung 16:	Temperaturverteilung am Kolben in einem Pkw-Dieselmotor bei Nennleistung [101]	35
Abbildung 17:	Relative Änderung von Kraftstoffmassenstrom und Motornennleistung aufgrund von Belägen in den Einspritzlöchern. [171].....	38
Abbildung 18:	Vergleich der Rußzahl von neuen („Before“) und beladenen („After“) Einspritzdüsen [22].....	38
Abbildung 19:	Einfluss von Drehzahl und Last auf die Einspritzdüsentemperatur [162].....	39
Abbildung 20:	Vergleich der Sensitivität zweier Einspritzdüsen gegenüber Ablagerungen [22].....	40
Abbildung 21:	Zusammenhang zwischen Abgasgegendruck (normalisiert) und Versuchsdauer [169]	43
Abbildung 22:	Abgasgegendruck des DPF in Abhängigkeit der Beladung [93].....	44
Abbildung 23:	Prinzipieller Aufbau des Verfahrens zur optischen Vermessung von Düsenlöchern [115]	51
Abbildung 24:	Temperaturverteilung am Vollventil [107].....	53
Abbildung 25:	Temperaturverteilung an einem Auslassventil [107]	53
Abbildung 26:	Vergleich des Druckverlusts von SiC- und SMF-Partikelfiltern (Messung) [168].....	54

Abbildung 27: Vergleich des Druckverlusts zwischen symmetrischer und asymmetrischer Kanalstruktur [3].....	54
Abbildung 28: Eingangsgrößen und Einflussfaktoren sowie Zielgrößen der Untersuchungen – Teil 1	58
Abbildung 29: Eingangsgrößen und Einflussfaktoren sowie Zielgrößen der Untersuchungen – Teil 2.....	59
Abbildung 30: Wirkketten von Ablagerungen an der Einspritzdüse und im Partikelfilter	64
Abbildung 31: BHKW-Prüfstands Aufbau	66
Abbildung 32: Vergleich des Verlaufs von kontinuierlich und in Intervallen gemessener Abgastemperatur beim Betrieb von BHKW 1 mit RÖK 4	68
Abbildung 33: Unterschiedliche Differenzierungsgrade bei der Erkennung von Ablagerungen	77
Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Generatorleistung und indiziertem Mitteldruck.....	80
Abbildung 35: Einfluss der Generatorleistung auf die Abgastemperatur	81
Abbildung 36: Vorgehensweise zur Korrektur des Betriebspunkts (nicht maßstäblich)	82
Abbildung 37: Vergleich unterschiedlicher Korrekturverfahren.....	84
Abbildung 38: Vergleich unterschiedlicher Korrekturverfahren - Ausschnitt	85
Abbildung 39: Aufteilung eines Signalverlaufs in Phasen positiver und negativer Steigung	87
Abbildung 40: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Dauerbetrieb).....	92
Abbildung 41: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Dauerbetrieb).....	92
Abbildung 42: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Dauerbetrieb)	93
Abbildung 43: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Dauerbetrieb)	94
Abbildung 44: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Taktbetrieb)	95
Abbildung 45: Verlauf der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Taktbetrieb)	95
Abbildung 46: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 1, Taktbetrieb).....	96
Abbildung 47: Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur (BHKW 2, Taktbetrieb).....	97
Abbildung 48: Zusammenhang zwischen Ablagerungsaufbau und Kraftstoffzusammensetzung.....	98
Abbildung 49: Zusammenhang zwischen Ablagerungsabbau und Kraftstoffzusammensetzung.....	99
Abbildung 50: Zusammenhang zwischen gewichteter Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur und Kraftstoffzusammensetzung	100
Abbildung 51: Emissionsverhalten bei störungsfreiem Normalbetrieb.....	101
Abbildung 52: Emissionsverhalten bei kontinuierlichem Aufbau von Ablagerungen.....	102
Abbildung 53: Emissionsverhalten bei sprunghaftem Abbau von Ablagerungen.....	103
Abbildung 54: Beladung des Partikelfilters bei unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten	104
Abbildung 55: Beladungsrate des Partikelfilters in Abhängigkeit der Kraftstoffzusammensetzung.....	105

Abbildung 56:	Zusammenhang zwischen Beladungsmasse und Differenzdruck über den Partikelfilter	106
Abbildung 57:	An- und Abströmseite eines stark beladenen DPF im Vergleich	106
Abbildung 58:	Längsschnitt durch einen stark beladenen DPF.....	106
Abbildung 59:	Detail der Anströmseite eines stark beladenen DPF.....	107
Abbildung 60:	Abhängigkeit der Einspritzdüsenbeläge von der Kraftstoffqualität.....	108
Abbildung 61:	Abhängigkeit der Einspritzdüsenbeläge von der Orientierung im Brennraum	109
Abbildung 62:	Bei der Demontage verursachter Abbruch von Ablagerungen	109
Abbildung 63:	Ablagerungen in der Einspritzdüse (BHKW 1)	110
Abbildung 64:	Ablagerungen in der Einspritzdüse (BHKW 2)	110
Abbildung 65:	Verteilung der Projektionsflächen über den Einspritzdüsenumfang (BHKW 1).....	113
Abbildung 66:	Verteilung der Projektionsflächen über den Einspritzdüsenumfang (BHKW 2).....	113
Abbildung 67:	Differenz der Gesamt-Projektionsflächen zur Referenzeinspritzdüse (BHKW 1).....	114
Abbildung 68:	Differenz der Gesamt-Projektionsflächen zur Referenzeinspritzdüse (BHKW 2).....	115
Abbildung 69:	Theoretische Richtung der Einspritzstrahlen auf Kolben.....	119
Abbildung 70:	Theoretische Richtung der Einspritzstrahlen auf Brennraumdecke.....	119
Abbildung 71:	Verlauf der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Betriebsprofilen	127
Abbildung 72:	Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Betriebsprofilen	128
Abbildung 73:	Zusammenhang zwischen Ablagerungsaufbau und Betriebsprofil.....	129
Abbildung 74:	Zusammenhang zwischen Ablagerungsabbau und Betriebsprofil.....	129
Abbildung 75:	Zusammenhang zwischen der gewichteten Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur und Betriebsprofil.....	130
Abbildung 76:	Typische Ausführung einer Wärmeleithülse aus Kupfer.....	131
Abbildung 77:	Einfluss der Wärmeabfuhr auf die Temperaturen an der Einspritzdüsen spitze und im Einspritzdüsenkörper.....	132
Abbildung 78:	Verlauf der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Temperaturen der Einspritzdüsen spitze	134
Abbildung 79:	Verlauf der positiven und negativen Änderungen der spezifischen Abgastemperatur bei unterschiedlichen Temperaturen der Einspritzdüsen spitze	134
Abbildung 80:	Zusammenhang zwischen Ablagerungsaufbau und Temperatur der Einspritzdüsen spitze	135
Abbildung 81:	Zusammenhang zwischen Ablagerungsabbau und Temperatur der Einspritzdüsen spitze	136
Abbildung 82:	Zusammenhang zwischen der gewichteten Signalabweichung der spezifischen Abgastemperatur und Temperatur der Einspritzdüsen spitze	136

Abbildung 83:	Messgrößen für unterschiedliche Differenzierungsgrade der Ablagerungsbildung	137
Abbildung 84:	Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bei Verwendung zweier unterschiedlicher Kraftstoffe.....	139
Abbildung 85:	Einfluss des Abgasgegendrucks auf Brennraumdruck und Verbrennungsablauf.....	141
Abbildung 86:	Einfluss von Brennraumablagerungen auf Brennraumdruck und Verbrennungsablauf.....	142
Abbildung 87:	Einfluss von Brennraumablagerungen auf den Summenheizverlauf.....	142
Abbildung 88:	Standardabweichung der Motordrehzahl.....	144
Abbildung 89:	Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks.....	144
Abbildung 90:	Einfluss des hydraulischen Durchflusses auf Einspritzdauer und Einspritzdruckverlauf.....	147
Abbildung 91:	Einspritzrate der untersuchten Einspritzdüsen in Abhängigkeit des Kraftstoffdrucks – Messpunkte und berechneter Verlauf in Abhängigkeit des Drucks.....	150
Abbildung 92:	Verlauf von Einspritzleitungsdruck (gemessen), Nadelhub (gemessen) und daraus berechneter eingespritzter Kraftstoffmasse über der Dauer des Einspritzvorgangs.....	152
Abbildung 93:	Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,16.....	153
Abbildung 94:	Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,18.....	153
Abbildung 95:	Tatsächlicher und berechneter Kraftstoffverbrauch bei einer „ideal verkokten“ Einspritzdüse (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele)	154
Abbildung 96:	Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,16.....	156
Abbildung 97:	Vergleich zwischen gemessenem Kraftstoffverbrauch und nach unterschiedlichen Verfahren berechneten theoretischen Kraftstoffverbräuchen in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,18.....	157
Abbildung 98:	Abweichungsquotienten zwischen theoretischem und gemessenem Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,16.....	158
Abbildung 99:	Abweichungsquotienten zwischen theoretischem und gemessenem Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Generatorleistung (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele) - ESD 0,18.....	158
Abbildung 100:	Tatsächlicher und berechneter Kraftstoffverbrauch bei einer „ideal verkokten“ Einspritzdüse - vereinfachter Modellansatz (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele)	159

Abbildung 101: Einfluss von hydraulischem Durchfluss und Leistung auf den Verbrennungsverzug (Mittelwerte über 20 Arbeitsspiele).....	161
Abbildung 102: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung.....	163
Abbildung 103: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung (Ausschnitt 1).....	164
Abbildung 104: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung (Ausschnitt 2).....	166
Abbildung 105: Signalverläufe verschiedener Kenngrößen zur Online-Erkennung von Ablagerungsbildung (Ausschnitt 3).....	167
Abbildung 106: EDX-Spektrum der Düsenkuppenbeläge (Dieselkraftstoff).....	171
Abbildung 107: EDX-Spektrum der Düsenkuppenbeläge (Rapsölkraftstoff).....	171
Abbildung 108: Einlassventil (BHKW 1, RÖK 4).....	172
Abbildung 109: Auslassventil (BHKW 1, RÖK 4).....	172
Abbildung 110: Bereiche starker Ablagerungen am Kolben (BHKW 1, RÖK 4).....	173
Abbildung 111: Bereiche starker Ablagerungen am Kolben (BHKW 2, RÖK 4).....	173
Abbildung 112: Lage der Kühlkanäle in 12 mm Tiefe.....	174
Abbildung 113: Lage der Kühlkanäle in 15 mm Tiefe.....	174
Abbildung 114: Lage der Kühlkanäle und Bereiche starker Ablagerungen (BHKW 1, RÖK 4).....	174
Abbildung 115: Lage der Kühlkanäle und Bereiche starker Ablagerungen (BHKW 2, RÖK 4).....	174
Abbildung 116: Vergleich verschiedener Auswertungsverfahren am Beispiel der spezifischen Abgastemperatur (Prüflauf "Taktbetrieb mit RÖK 1").....	184
Abbildung 117: Vergleich der motorischen Relevanz verschiedener Ablagerungsorte.....	186

Anhang D: Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wichtige Kenngrößen von Rapsöl, Dieselmotortreibstoff und Rapsmethylester	14
Tabelle 2:	Entwicklung von Grenzwerten für Dieselmotortreibstoff	15
Tabelle 3:	Analysenergebnisse der Rückstände [138]	24
Tabelle 4:	Mechanismen des Ablagerungsabbaus im Überblick, nach [103].....	31
Tabelle 5:	Gliederung von Ablagerungsbildung und daraus resultierenden Effekten.....	32
Tabelle 6:	Beurteilung von Sensitivität und Relevanz von Ablagerungen (1).....	63
Tabelle 7:	Technische Daten der BHKW	66
Tabelle 8:	Beschreibung der Temperaturmessstellen an den Düsenhalterkombinationen	69
Tabelle 9:	Variable Kraftstoffeigenschaften der eingesetzten Dieselmotortreibstoffe	70
Tabelle 10:	Elementgehalte des eingesetzten Schmieröls	71
Tabelle 11:	Übersicht über das Versuchsprogramm	72
Tabelle 12:	Übersicht über die Langzeitprüfläufe	73
Tabelle 13:	Überblick über die Prüfläufe zur Untersuchung des Einflusses des Betriebsprofils	74
Tabelle 14:	Überblick über die Prüfläufe zur Untersuchung des Einflusses des Temperaturniveaus	76
Tabelle 15:	mögliche Messgrößen in Abhängigkeit des Detaillierungsgrads.....	78
Tabelle 16:	Verfahren zur Auswertung der Messdaten	79
Tabelle 17:	Übersicht über Verfahren zur Bauteilbeurteilung	89
Tabelle 18:	Profilaufnahmen der Düsenkuppe der Einspritzdüsen der Prüfläufe (BHKW 1)...	111
Tabelle 19:	Profilaufnahmen der Düsenkuppe der Einspritzdüsen der Prüfläufe (BHKW 2)...	112
Tabelle 20:	Endoskopaufnahmen von Bereichen des Brennraums nach unterschiedlicher Betriebsdauer am Beispiel des Betriebs von BHKW 1 mit RÖK 4	116
Tabelle 21:	Visuelle Befundung von Brennraumdecke, Ventilen und Kolben (BHKW 1)	117
Tabelle 22:	Visuelle Befundung von Brennraumdecke, Ventilen und Kolben (BHKW 2)	118
Tabelle 23:	Visuelle Befundung der Auslassventile (BHKW 1).....	120
Tabelle 24:	Visuelle Befundung der Auslassventile (BHKW 2).....	121
Tabelle 25:	Visuelle Befundung der Einlassventile (BHKW 1).....	122
Tabelle 26:	Visuelle Befundung der Einlassventile (BHKW 2).....	123
Tabelle 27:	Visuelle Befundung der Kolben (BHKW 1)	124
Tabelle 28:	Visuelle Befundung der Kolben (BHKW 2)	125
Tabelle 29:	Versuchsreihen zum Einfluss des Betriebsprofils	126
Tabelle 30:	Daten der untersuchten Einspritzdüsen.....	146
Tabelle 31:	Zusammenhang zwischen hydraulischem Durchfluss und geometrischer Spritzlochquerschnittsfläche – Einspritzdüse 0,18 im Vergleich zu 0,16.....	146
Tabelle 32:	Beurteilung von Sensitivität und Relevanz von Ablagerungen (2).....	177
Tabelle 33:	Änderung der die Ablagerungsbildung beschreibenden Größen bezogen auf RÖK 1.....	185

Anhang E: Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
ASTM	American Society for Testing and Materials
Bh	Betriebsstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BtL	Biomass to Liquid
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CR	Common Rail
CRT	Continuously Regenerating Trap
CRC	Coordinating Research Council
d. h.	das heisst
DHK	Düsenhalterkombination
DI	direkteinspritzend
DIN	Deutsches Institut für Normung
DPF	Dieselpartikelfilter
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EN	Europäische Norm
ESD	Einspritzdüse
FAME	Fatty Acid Methyl Ester
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
ISO	International Organization for Standardization
KW	Kurbelwinkel
LLK	Ladeluftkühler
OBD	On-Board-Diagnose
OBM	On-Board-Measurement
OT	oberer Totpunkt
PKW	Personenkraftwagen
RME	Rapsmethylester
SCR	selective catalytic reduction
SMF	Sintermetall-Partikelfilter
SOF	Soluble Organic Fraction
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
US-EPA	Environmental Protection Agency
vs.	versus
XRD	X-Ray Diffraction
z. B.	zum Beispiel

Anhang F: Formelzeichen, griechische Symbole

b_e	spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	Konstante (allgemein)
GSA	gewichtete Signalabweichung
h	Höhe
i	Taktverhältnis (beim 4-Takt-Motor: 0,5)
j	Zählvariable (allgemein)
m	Steigungsfaktor (allgemein)
$m_{\text{Hub,theor.}}$	theoretisch eingespritzte Kraftstoffmasse pro Einspritzhub
\dot{m}	Kraftstoffmassenstrom
\dot{m}_b	Kraftstoffverbrauch
$\dot{m}_{b,\text{theor.}}$	theoretischer Kraftstoffverbrauch
$\dot{m}_{\text{Düse neu,theor.}}$	Kraftstoffmassenstrom bei neuer Einspritzdüse
\dot{m}_{real}	tatsächlicher Kraftstoffmassenstrom
\dot{m}_{Ersatz}	Kraftstoffmassenstrom bei Ersatzdruck
\dot{m}_{ref}	Referenz-Kraftstoffmassenstrom
n_{Motor}	Motordrehzahl
n	Anzahl Messwerte
p	Druck (allgemein)
p_{Abgas}	Abgasegendruck
p_{Ersatz}	Ersatzdruck zur Online-Berechnung des hydraulischen Durchflusses
p_{ESD}	Druck in Einspritzdüse
$p_{\text{ESD,ref}}$	Referenzdruck in Einspritzdüse
p_{max}	Maximaldruck
$p_{\text{max,Zylinder}}$	Maximaldruck im Zylinder
p_{mi}	indizierter Mitteldruck
p_{Zyl}	Brennraumdruck
P_{el}	elektrische Leistung des Generators
$P_{\text{el,soll}}$	elektrische Sollleistung des Generators
Q_{Hyd}	Hydraulischer Durchfluss der Einspritzdüse (allgemein)
$Q_{\text{Hyd, Düse neu}}$	Hydraulischer Durchfluss bei neuer Einspritzdüse
$Q_{\text{Hyd, real}}$	tatsächlicher hydraulischer Durchfluss der Einspritzdüse
r	Radius
SD_{pmi}	Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks
t	Zeit
t_{inj}	Einspritzdauer
$t_{\text{inj_Begin}}$	Zeitpunkt des Einspritzbeginns
$t_{\text{inj_Ende}}$	Zeitpunkt des Einspritzendes
$T_{\text{Abgas_ideal}}$	ideale Abgastemperatur
$T_{\text{Abgas_korrigiert}}$	Abgastemperatur nach Betriebspunkt korrigiert
$T_{\text{Abgas_real}}$	reale Abgastemperatur
$T_{\text{Abgas_soll}}$	Soll-Abgastemperatur
$T_{\text{Abgas_spezifisch}}$	spezifische Abgastemperatur
T_{Saugrohr}	Ansauglufttemperatur
VBVZ	Verbrennungsverzug
y	Messgröße (allgemein)
α	Füllungsgrad der Einspritzpumpe

ε	Verdichtungsverhältnis
φ	Kurbelwinkelposition allgemein
φ_{inj_Beginn}	Kurbelwinkel bei Einspritzbeginn
φ_{inj_Ende}	Kurbelwinkel bei Einspritzende
$\varphi_{inj_Beginn, 10\%}$	Kurbelwinkel bei 10 % Nadelöffnung
$\varphi_{Umsatzpunkt\ der\ Verbrennung, X\ \%}$	Kurbelwinkel des X-% Umsatzpunktes der Verbrennung
π	Kreiszahl
ρ	Dichte

Anhang G: Einheiten

bar	Bar
Bh	Betriebsstunde
ct	Cent
deg	Grad
g	Gramm
h	Stunde
Hz	Hertz
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kW _{el}	Kilowatt elektrische Leistung
l	Liter
m ³	Kubikmeter
mbar	Millibar
mg	Milligramm
min ⁻¹	Umdrehungen pro Minute
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
mm ³	Kubikmillimeter
ms	Millisekunde
ppm	parts per million
t	Tonne
Vol-%	Volumen-Prozent
W	Watt
°C	Grad Celsius
°KW	Grad Kurbelwinkel

Anhang H: Chemische Symbole

Al	Aluminium
C	atomarer Kohlenstoff
Ca	Calcium
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Fe	Eisen
H	atomarer Wasserstoff
K	Kalium
KOH	Kaliumhydroxid
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Ni	Nickel
NO _x	Stickoxide
O	atomarer Sauerstoff
O ₂	molekularer Sauerstoff
P	Phosphor
S	Schwefel
SiC	Siliciumcarbid
SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₃	Schwefeltrioxid
THC	Gesamt-Kohlenwasserstoffe
Zn	Zink

Anhang I: Vorveröffentlichungen und Vorträge aus dem Themenkreis der Dissertation

Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits in folgenden Veröffentlichungen und Vorträgen vorgestellt:

Veröffentlichungen

1. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M.; Verifizierung ausgewählter Rapsölkraftstoffkennwerte aus der DIN V 51605 hinsichtlich ihrer motorischen Relevanz; Tagungsband zum 15. Symposium Bioenergie 2006, ISBN 3-934681-49-2
2. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M., Schieder, D.; Untersuchung der Phosphor-, Kalzium- und Magnesium-Grenzwerte der V DIN 51605 hinsichtlich ihrer Relevanz für rapsölbetriebene Klein-BHKW; Tagungsband zum 16. Symposium Bioenergie 2007, ISBN 978-3-934681-62-0
3. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M.; Ablagerungsbildung im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem von rapsölbetriebenen BHKW; VDI-Berichte 2046: Blockheizkraftwerke 2008, ISBN 978-3-18-092046-7
4. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M.; Standardisation of 1st generation biofuels – investigating the effect of ash-forming fuel elements of rape seed oil in combustion chamber and exhaust aftertreatment system; Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition, 2-6 June 2008, Valencia, Spain, ISBN 978-88-89407-58-1

Vorträge

1. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M.; Verifizierung ausgewählter Rapsölkraftstoffkennwerte aus der DIN V 51605 hinsichtlich ihrer motorischen Relevanz; 15. OTTI-Symposium Bioenergie, 23./24. 11.2006, Bad Staffelstein
2. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M., Schieder, D.; Einfluss der Kraftstoffqualität auf das Betriebsverhalten von rapsölbetriebenen BHKW; 1. Pflanzenöl-BHKW-Forum - RENEXPO, 27.9.2007, Augsburg
3. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M., Schieder, D.; Untersuchung der Phosphor-, Kalzium- und Magnesium-Grenzwerte der V DIN 51605 hinsichtlich ihrer Relevanz für rapsölbetriebene Klein-BHKW; 16. OTTI-Symposium Bioenergie, 22./23. 11.2007, Bad Staffelstein
4. Klaissle, M., Schreiner, K., Faulstich, M.; Ablagerungsbildung im Brennraum und Abgasnachbehandlungssystem von rapsölbetriebenen BHKW; VDI-Fachtagung Blockheizkraftwerke 2008 – Im Focus biogener Brennstoffe – Technik – Betriebserfahrungen, 23./24. 9.2008, Fulda