Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Differenzierung unterschiedlicher Brennstoffqualitäten im Hinblick auf die Ablagerungsbildung

Teilvorhaben 1: Einfluss von Vliesvariablen

Teilvorhaben 2: Entwicklung von Prüfmethoden für unterschiedliche Biokraftstoffqualitäten zur Flammencharakterisierung sowie zu Verdampfungseigenschaften und deren Einfluss auf die Ablagerungsbildung

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Webasto Thermo & Comfort SE

Teilvorhaben 2: OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH

Förderkennzeichen:

22402815, 22402915

Laufzeit:

01.11.2015 bis 31.10.2016

Datum der Veröffentlichung:

20.04.2017

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Verbundpartner

Webasto Thermo & Comfort SE
Friedrichshafener Str. 9
D-82205 Gilching
www.webasto.com

OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH
Kaiserstr. 100
D-52134 Herzogenrath
www.owi-aachen.de

Projektleitung

Martin Zoske, Webasto Thermo & Comfort SE

Autoren

Martin Zoske
Webasto Thermo & Comfort SE
+49 (89) 85794 - 1299
martin.zoske@webasto.com

Sebastian Feldhoff
OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH
+49 (2407) 9518 - 117
S.Feldhoff@owi-aachen.de

Projektträger

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
Hofplatz 1
D-18276 Gülzow-Prüzen
www.fnr.de

Inhalt

1 Ziele 1
1.1 Aufgabenstellung 1
1.2 Stand der Technik 2
1.3 Zusammenarbeit 3
2 Ergebnisse 5
2.1 Arbeitspaket: Einfluss von Vliesvariablen 5
2.2 Arbeitspaket: Ablagerungs- und Sedimentbildung von Benzin-Blends 33
2.3 Arbeitspaket: Ablagerungs- und Sedimentbildung von Diesel-Blends 39
2.4 Arbeitspaket: Einfluss Pumpenvariablen 48
2.5 Arbeitspaket: Untersuchung laminarer Flammgeschwindigkeiten 57
3 Fazit 65
3.1 Zusammenfassung 65
3.2 Verwertung 66
3.3 Erkenntnisse von Dritten 67
3.4 Veröffentlichungen 67
Literaturverzeichnis 69
Anhang 71
Teilvorhaben 1 71
a) Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 71
b) Bearbeitete Arbeitspakete 71
c) Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 71
Teilvorhaben 2 73
a) Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 73
b) Bearbeitete Arbeitspakete 74
c) Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 74
Kraftstoffanalysen 76

1 Ziele

1.1 Aufgabenstellung

Die weltweite Zunahme an Fahrzeugen und dem Straßenverkehr stellt für die Erreichung der internationalen Klimaschutzziele eine besondere Herausforderung dar. Nach Auffassung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) besitzt hierbei die Verwendung von Bioenergie, z.B. in Form von Kraftstoffen auf regenerativer Basis, ein hohes Potential, langfristig Treibhausgasemissionen zu reduzieren. [1]

Der Einsatz von reinen biogenen Kraftstoffen und deren Beimischung zu fossilen Treibstoffen wird daher in absehbarer Zeit das heutige Niveau übersteigen. Die Richtlinie 2009/28/EG der Europäischen Union sieht vor, dass bis 2020 mindestens 10% des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor aus erneuerbaren Energien bestehen soll. Neben dem Einsatz von Elektrizität, die aus erneuerbaren Energien hergestellt wird, sind vor allem Biokraftstoffe dazu geeignet, dieses Ziel zu erreichen. [2]

Der Einfluss solcher regenerativ erzeugten Treibstoffe auf die Motoren und die kraftstoffführenden Bauteile von Fahrzeugen ist und war Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben. Aufgrund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften stellen Bio-Kraftstoffe dabei bestimmte Anforderungen an die Fahrzeugtechnik. [3] [4] [5]

Während kraftstoffbetriebene Standheizungen häufig verbaute Ausstattungsoptionen von Personenwagen sind und hauptsächlich dem Fahrgast-Komfort dienen, stellen derartige Heizungen im Lastverkehr, bei Sondermaschinen oder im Camping-Bereich motorunabhängige Wärmequellen dar, ohne die der Einsatz der Fahrzeuge nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich wäre. Ohne die technisch der Standheizung ähnlichen Zuheizer könnten moderne, effiziente Dieselmotoren den Wärmebedarf von vielen Fahrzeugtypen nicht mehr decken. [6]

Aktuell markttypische Kraftstoffe, mit einer Beimischung von bis zu 7 % Fettsäuremethylester im Dieselkraftstoff (B7) und bis zu 10 % Ethanol im Ottokraftstoff (E10) eignen sich ohne Funktionseinschränkungen für den Betrieb von modernen Stand- und Zuheizungen. Mit entsprechend freigegebenen Modellen ist auch der Betrieb mit reinem Biodiesel aus Fettsäuremethylester (B100) oder hoch ethanolhaltigen Ottokraftstoffen (E85) möglich. [7] [8] [9] [10]

Bisherige Untersuchungen weisen bereits darauf hin, dass eine Zunahme oder Diversifizierung der biogenen Komponenten im Kraftstoff ohne eine entsprechende Anpassung der Heizgeräte deren Zuverlässigkeit oder Lebensdauer beeinträchtigen kann [11].

In diesem Projekt wird der Einfluss verschiedener biogener Brennstoffe unter variablen Randbedingungen auf die Funktion von Fahrzeugstandheizungen untersucht. Im Fokus steht die Neigung der Brennstoffe zur Bildung von Ablagerungen und Rückständen. Diese können unter bestimmten Bedingungen die Funktion von Heizgeräten maßgeblich einschränken. Der Untersuchungsumfang umfasst sowohl Dieselkraftstoffblends mit Beimischungen von Fettsäuremethylester (FAME) und reinen (PfÖl, SVO) sowie vollständig hydrierten Pflanzenölen (HVO), als auch Ottokraftstoffe mit Zusatz von Ethanol, Methanol oder Butanol.

Zur Bewertung werden zum einen idealisierte Versuche mit einem Prüfstand zur Einzeltropfenverdampfung auf heißen Oberflächen (Tiegelverdampfer) durchgeführt. Hierbei können die prinzipiellen chemisch-physikalischen Vorgänge bei der Entstehung von Ablagerungen optimal beobachtet werden. Zum anderen soll mit einem realitätsnahen Prüfaufbau die Ablagerungsbildung bei kontinuierlicher Verdampfung in einem porösen Medium (Verdampfer-Vlies) untersucht werden, was dem Prinzip der Brennstoffaufbereitung bei typischen Fahrzeugstandheizungen entspricht. Als Randbedingungen werden z.B. die Temperatur, die Brennstoffzusammensetzung oder die Eigenschaften des porösen Mediums variiert. Ziel ist die bestmögliche Auslegung von Verdampferbrennern, besonders für zukünftige, höhere Zumischquoten von Bio-Kraftstoffen im nationalen und internationalen Markt.

Speziell für Diesel-Kraftstoffe wird ferner der Einfluss von biogenen Bestandteilen auf die Funktion der bei mobilen Heizgeräten häufig eingesetzten Hubkolben-Dosierpumpen in entsprechenden Dauerlauf-Tests untersucht. Damit soll die Funktionssicherheit dieser Fördereinrichtung auch bei kritischen Kraftstoffen bzgl. Ablagerungsbildung und Bauteilverschleiß nachgewiesen werden.

Zudem wird an einem entsprechenden Prüfstand (Heatflux-Methode) die Beeinflussung der laminaren Brenngeschwindigkeit durch Alkohol-Beimischungen, wie Ethanol oder Butanol, in Ottokraftstoffen bestimmt.

Diese Ergebnisse sind ebenfalls wesentlich für die Auslegung der Brennraumgeometrie für entsprechende Brennstoffe, unter anderem um einen minimalen Schadstoffausstoß sicherzustellen.

Gesamt-Ziel des Forschungsprojekts ist somit der Aufbau eines tieferen Verständnisses für die Wechselwirkungen zwischen biogenen Kraftstoffbestandteilen und den Komponenten von Standheizungen. Damit können aktuelle Modelle von Heizungen einfacher für zukünftige Brennstoffsorten freigegeben und durch gezielte Entwicklung die langfristige Verwendbarkeit von Standheizungen sichergestellt werden.

Die Aufgabenstellung wird in einem Verbundvorhaben zwischen der Webasto Thermo & Comfort SE am Standort Gilching und der OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH in Herzogenrath bearbeitet. Das Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ unterstützt.

Die Webasto Gruppe ist international in den Unternehmensbereichen Dach- und Thermosysteme tätig und entwickelt und produziert Stand- und Zuheizungen. Der Marktführer bringt umfangreiche Entwicklungserfahrung sowie vielfältige Kennnisse aus dem realen Feldeinsatz von mobilen Heizgeräten mit. In der Vergangenheit wurden bereits mehrere interne Untersuchungen zur Ablagerungsbildung von Brennstoffen durchgeführt, auf denen das jetzige Vorhaben aufbauen kann.

Als An-Institut der RWTH Aachen fungiert die Oel-Wärme-Insititut gGmbH (OWI) als Mittler zwischen akademischer Forschung und industrieller Anwendung im Bereich der Wärme- und Stromerzeugung. Mit der Fokussierung auf energieeffiziente und emissionsarme Nutzung von fossilen und regenerativen flüssigen Brennstoffen stellt das OWI die wissenschaftlichen Grundlagen sowie jahrelange branchenübergreifende Erfahrungen im Einsatz moderner Feuerungstechnik bereit.

1.2 Stand der Technik

Für die konventionellen, mineralölstämmigen, flüssigen Kraftstoffe existieren umfangreiche Untersuchungen zu deren Ablagerungsverhalten. Betrachtet werden sowohl die chemisch-physikalischen Mechanismen hinter der Rückstandsbildung als auch der Einfluss der Randbedingungen bei verschiedenen technischen Anwendungen wie Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen. Anwendungsbedingt ist die Bildung von Ablagerungen auf glatten, metallischen Oberflächen der typische Betrachtungsfall. [12] [13] [14] [15]

Die Rückstandsbildung von biogenen Dieselkraftstoff-Substituten wie Fettsäuremethylester (FAME) oder reinen Pflanzenölen (SVO bzw. PfÖl) ist nach wie vor Gegenstand der Forschung. Die im Vergleich zu fossilen Treibstoffen chemisch veränderte Zusammensetzung bedingt andere Ablagerungsbildungs-mechanismen wie Polymerisationsreaktionen und ein verändertes Verhalten bezüglich der Randbedingungen wie der Temperatur [4] [16] [17]. Das Ablagerungsverhalten von hydrierten Pflanzenölen (HVO) als Rein-Kraftstoff oder als Blendkomponente ist derzeit noch kaum erforscht.

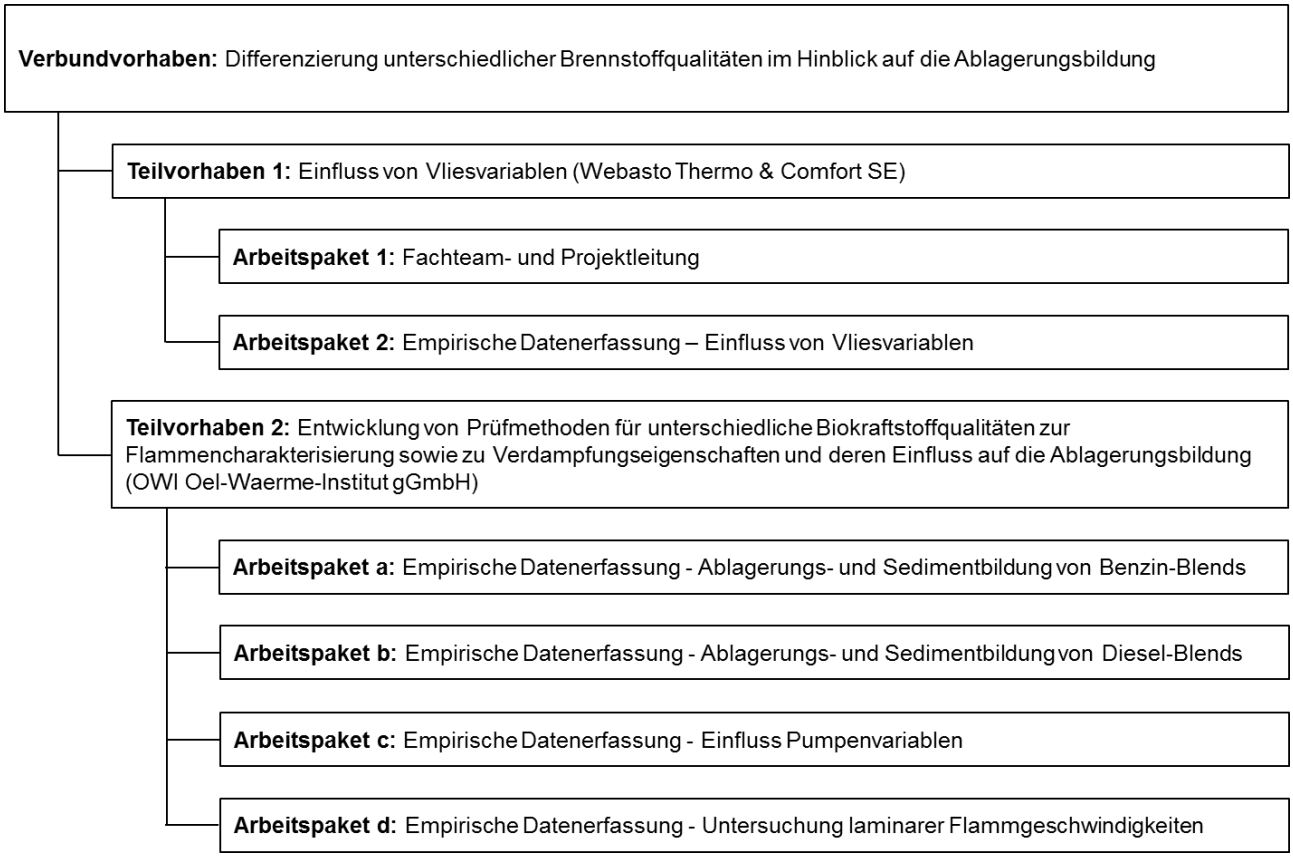
Untersuchungen zur Ablagerungsbildung im Fall von Alkohol-Beimischungen zu Motoren-Benzin konzentrieren sich bislang hauptsächlich auf Ethanol und die Verwendung in Ottomotoren. Während die direkte Bildung von Rückständen aus dem Ethanol im Kraftstoff nicht zu erwarten ist, sind dessen Eigenschaften als Lösungsmittel dazu geeignet, vorhandene Rückstände im Brennstoffsystem oder Substanzen aus Bauteilen zu lösen und an anderer Stelle, wie z.B. dem Kraftstofffilter oder den Einlassventilen zu akkumulieren [18] [19]. Studien zeigen allerdings auch in bestimmten Fällen eine Zunahme von Ablagerungen im Ansaugsystem und im Brennraum von Ottomotoren bei erhöhtem Ethanol-Gehalt im Kraftstoff, was mit Wechselwirkungen zwischen dem Treibstoff und der speziellen Konstruktion des Motors z.B. der Auslegung der Abgasrückführung, begründet wird. Die Bildung von derartigen Rückständen kann durch eine geeignete Additivierung des Kraftstoffs vermindert werden [20] [21] [22]. Weitere einwertige Alkohole wie Methanol oder Butanol, die sich als Beimischung zu Ottokraftstoff eignen, sind bezüglich ihrer Neigung zur Bildung von Rückständen bislang wenig untersucht. Erste Erfahrungen mit Butanol als Blendkomponente zeigen, dass die Ablagerungen im Ansaugsystem und im Brennraum im Vergleich zu rein-fossilem Ottokraftstoff verringert werden können [23].

Im „GObio“-Verbundvorhaben werden mittels idealisierter Tropfenverdampfung in einem Tiegelverdampfer bereits erste wichtige Einflussparameter auf die Ablagerungsbildung für Diesel-FAME-Mischungen ermittelt. In anschließenden Dauerlaufversuchen mit kompletten Standheizungs-Systemen, basierend auf Verdampfer-Brennern, können FAME-Beimischungen größer 10 % nicht ohne Anpassung der Brenner

verwendet werden. Trotzdem ist hier die Lebensdauer der Heizgeräte durch Ablagerungsbildung im Brenner oft deutlich eingeschränkt. Die Beimischung von hydrierten Pflanzenölen zum Diesel- oder Ethanol und Butanol zum Ottokraftstoff bewirkt hingegen keine Einschränkung der Brenner-Standzeit. Entgegengesetzt kommt es bei den verwendeten Dosierpumpen zu Ausfällen bei Ethanolzugabe, während FAME, HVO und Butanol ohne Einschränkungen vertragen werden. [11]

1.3 Zusammenarbeit

Die Aufteilung und Bearbeitung der jeweiligen Teilvorhaben und Arbeitspakete gestaltet sich wie folgt, die Bezeichnungen entsprechen denen aus der Kommunikation mit den öffentlichen Stellen:



Chemisch-physikalische Analysen und deren Auswertung von Kraftstoffen von Kraftstoffrückständen, die nicht bei Webasto oder dem OWI durchgeführt werden können, übernehmen die ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH in Neusäss und die Currenta GmbH & Co. OHG in Leverkusen.

2 Ergebnisse

2.1 Arbeitspaket: Einfluss von Vliesvariablen

In dem für dieses Vorhaben entwickelten Prüfaufbau wird die Verdampfung von flüssigen Kraftstoffen innerhalb eines porösen Verdampfermediums, wie sie typischerweise in Verdampferbrennern abläuft, unter idealisierten Bedingungen nachgebildet. Dazu ist der zu untersuchende Verdampfer in einem abgeschlossenen Reaktionsgefäß auf einer flächigen Rückwand befestigt, die elektrisch auf eine vorgegebene Temperatur beheizt werden kann. Dies bildet den Wärmeeintrag über die Verdampferaufnahme am realen Brenner nach. Die andere Seite des Verdampfers wird mit einem ebenfalls elektrisch erhitzten Stickstoff-Strom in Form einer zentralen Prallströmung beaufschlagt. Dieser hauptsächlich konvektive Wärmeeintrag simuliert den Enthalpiestrom aus der Flamme, die in einem realen Brennersystem innerhalb der Brennkammer liegt, die an den Verdampfer anschließt. Das Reaktionsgefäß ist aus temperaturbeständigem, transparentem Borosilikatglas gefertigt, um die optische Beobachtung der Vorgänge am Verdampfer zu ermöglichen.

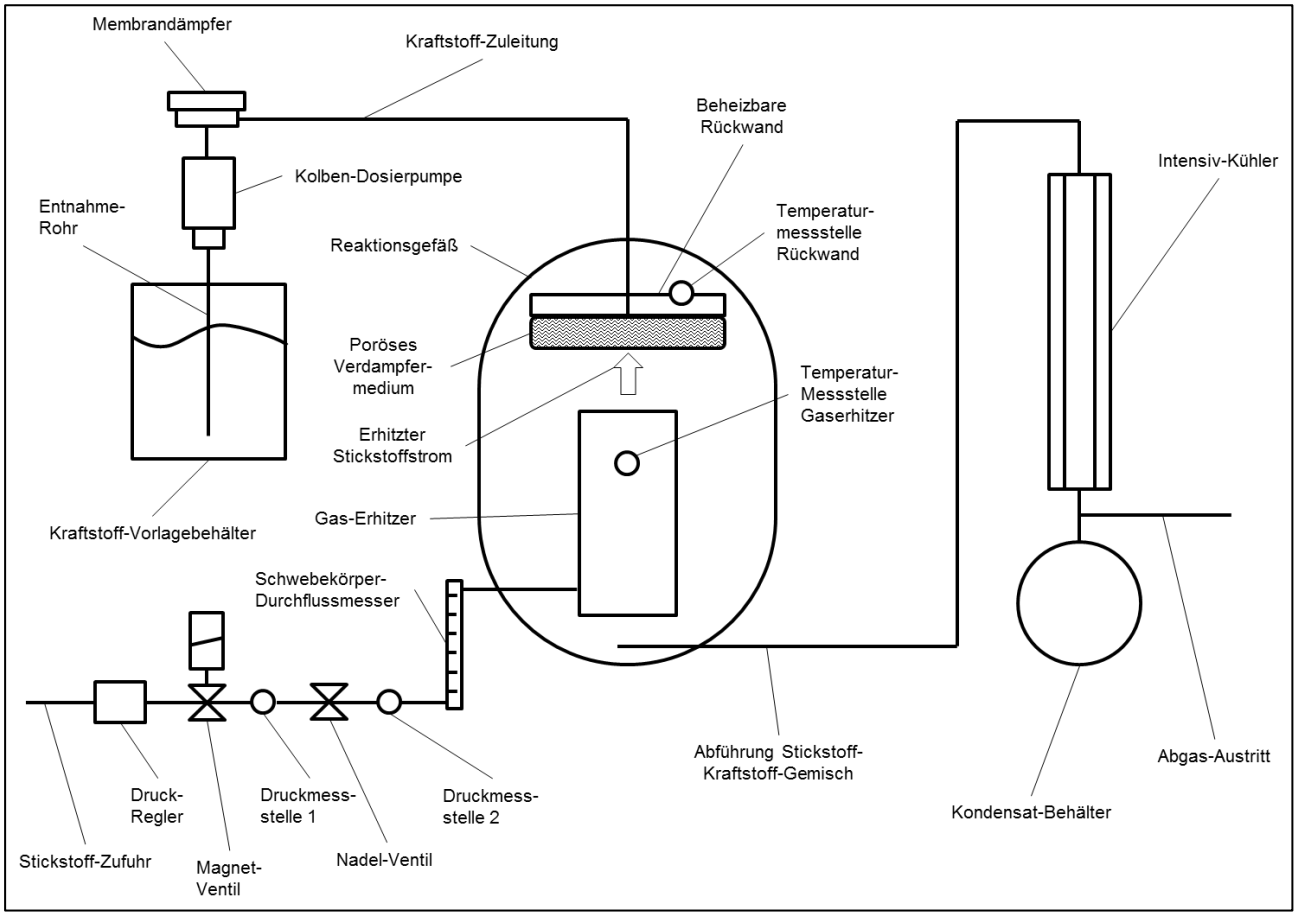


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Verdampfer-Prüfstandes

Der flüssige Kraftstoff wird entsprechend gängigen Brennertypen zentral von hinten in das Verdampfermedium eingebracht, in dem er anschließend vollständig verdampft. Die entstandene Mischung aus gasförmigem Kraftstoff und Stickstoff wird aus dem Reaktionsgefäß geleitet und in eine geeignete Absaugung geführt. Die Einbaulage des Verdampfers bzw. des gesamten Reaktionsgefäßes ist variabel, wird aber für die folgenden Versuche, wie in Abbildung 1 dargestellt, ausschließlich mit der Flammenseite des Verdampfers in Schwerkraftrichtung betrieben. Diese Orientierung entspricht der häufig gewählten Einbausituation von Standheizungen mit einer Hauptströmungsrichtung in der Brennkammer senkrecht nach unten. Zusätzlich vereinfacht diese Einbaulage das optische Erkennen einer unvollständigen Verdampfung

durch Abtropfen von flüssigem Brennstoff. Die weitestgehend symmetrische Verteilung von Kraftstoff und dementsprechend von Rückständen im porösen Medium vereinfacht außerdem eine spätere Lokalisation der Ablagerungen bei der Stoffanalytik.

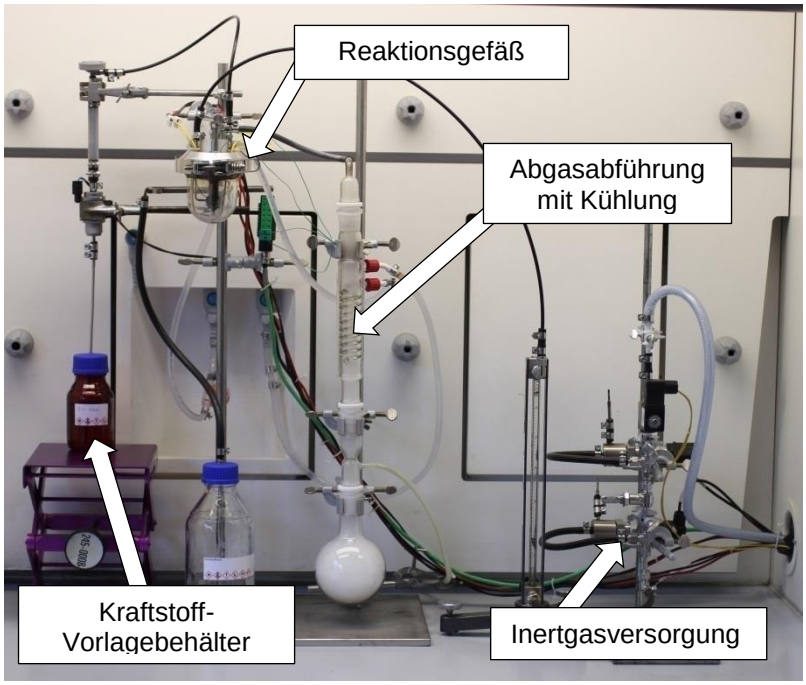


Abbildung 2: Aufbau des Verdampfer-Prüfstandes in einem Labor-Abzug

Als Inertgas wird nach Vorversuchen mit verschiedenen Gasen reiner Stickstoff ausgewählt, da damit die Atmosphäre im realen Brenner am ehesten abgebildet wird und zudem die hohe spezifische Wärmekapazität einen ausreichenden Wärmestrom auf die Verdampferoberfläche ermöglicht. Die Versorgung erfolgt über einen Druckregler und ein nachgeschaltetes Nadelventil. Über einen Schwebekörper-Durchflussmesser kann der Volumenstrom ermittelt werden. Für alle beschriebenen Versuche werden 100 Nl/h gewählt, da damit ein ausreichender Wärmeeintrag bei realitätsnahen Strömungsgeschwindigkeiten an der flammseitigen Verdampferoberfläche sichergestellt ist. Die beiden zusätzlich verbauten, digital aufgezeichneten Druckaufnehmer erlauben auch eine nachträgliche Überprüfung des Volumenstroms sowie eine Kontrolle des Drucks im Reaktionsgefäß. Dieser liegt durch den vernachlässigbaren Druckverlust in der Abgasabführung im Bereich des Umgebungsdrucks, was auch auf die Brennräume von Standheizungen zutrifft.

Der flüssige Brennstoff wird durch eine, auch bei Standheizungen eingesetzte, Hubkolben-Dosierpumpe intermittierend aus einem Vorlagebehälter gefördert. Der Pumpe nachgeschaltet ist ein Membran-Pulsationsdämpfer, um den Eintrittsimpuls der Flüssigkeit in den Verdampfer zu verringern. Dieser wird ebenfalls bei einigen Standheizungsmodellen verwendet, um eine kontinuierliche Brennstoff-Verdampfung zu gewährleisten. Im Prüfaufbau verhindert er das impulsbedingte Durchtreten von flüssigem Brennstoff durch den Verdampfer bei bestimmten, grenzwertigen Temperatur-Brennstoff-Verdampfer-Kombinationen.

Durch die Abführung des Abgases am tiefsten Punkt des Reaktionsgefäßes wird rekondensierter, flüssiger Brennstoff zuverlässig ausgetragen. Der nachgeschaltete Intensivkühler kann einen Großteil des Brennstoffdampfes aus dem Abgas entfernen, das übrige Gemisch wird direkt in eine explosionsgeschützte Absaugung geleitet. Die vollkommene Inertisierung des Systems und der Aufbau in einem Laborabzug gewährleisten die nötige Sicherheit, speziell bei der Verdampfung von Benzin-Ethanol-Methanol-Blends (siehe Abbildung 2).

Durch die voll automatisierte Steuerung bzw. Regelung des Versuchsablaufs kann die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unterstützt werden. Aktiv geregelte Parameter sind die Temperatur der Rückwand und die des Stickstoff-Stroms. Die Dosierpumpe und das Magnetventil in der Gasversorgung werden ebenfalls automatisch angesteuert. Die festgelegte Prüfroutine umfasst die Aktivierung des Gasflusses, das Aufheizen der Rückwand sowie des Gasstroms und bei Erreichen der Soll-Temperaturen die Aktivierung der

Dosierpumpe. Nach einer einstellbaren Prüfdauer werden die Pumpe deaktiviert und die Heizungen abgeschaltet. Nach einer Nachlaufzeit von 15 Minuten wird ebenfalls der Gasfluss unterbrochen. Dies stellt insbesondere in den Abkühlphasen der einzelnen Versuche identische Bedingungen sicher, da auch hier noch eine Veränderung der Ablagerungsmenge im Verdampfer möglich ist.

Der gesamte Versuchsablauf beinhaltet das Wiegen des Verdampfers im Neuzustand, den Einbau in den Prüfstand, den Start der Prüfroutine und das abschließende Wiegen des Verdampfers mit den Ablagerungen unmittelbar nach Ende des Versuchs. Ergebnisgröße ist die Massenzunahme der Verdampfer über den Versuch. Für jeden Versuch wird ein neuer Verdampfer verwendet, die getesteten werden bei Raumtemperatur und unter Umgebungsatmosphäre, geschützt vor externer Verunreinigung aufbewahrt.

Vorteile der idealisierten Bedingungen am Prüfaufbau im Gegensatz zu Untersuchungen an realen Brennern bestehen hauptsächlich in der zuverlässigen Kontrolle der Randbedingungen, der vollständigen Inertisierung zur Vermeidung von oxidativen Abbau-Prozessen sowie der Vermeidung des Eintrags von Verbrennungsrückständen aus der Reaktionszone in den Verdampfer. Zudem ist der mechanische Verbau der Verdampfer deutlich vereinfacht und es können auch geometrisch unterschiedliche poröse Medien untersucht werden, z.B. mit veränderter Dicke. Entgegen typischer bekannter Versuchsprinzipien zur Untersuchung der Ablagerungsbildung aus der Literatur, die meist die Verdampfung auf einer glatten Oberfläche beinhalten, können hier die speziellen Bedingungen im porösen Verdampfer einer Standheizung nachgebildet werden, z.B. die durch die Kapillarkraft getriebenen Transportvorgänge, die große, für die Verdampfung zu Verfügung stehende Oberfläche oder der charakteristische Temperaturgradient ausgehend vom Brennstoffeintritt.

Untersucht werden soll hauptsächlich der Einfluss des Verdampfermaterials, der Temperaturen und der Brennstoffzusammensetzung auf die Menge der gebildeten Ablagerungen im Verdampfer. Da die Brennstoffmenge nicht zwingend einen linearen Einfluss auf die Rückstandsmenge haben muss bzw. der Brennstoffmassenstrom wegen der veränderten Siedezonen im porösen Medium ebenfalls die Ablagerungsbildung beeinflussen kann, sollen auch zwei unterschiedliche Förderraten der Dosierpumpe untersucht werden. Um eine geeignete Versuchsdauer festzulegen, wird zudem dieser Einfluss vor Beginn der eigentlichen Versuche bewertet.

Eine vollständige Versuchsmatrix mit Berücksichtig aller möglichen Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Parametern ist praktisch nicht bearbeitbar. Bei der Planung der durchzuführenden Versuche werden verschiedene Varianten der manuellen Versuchsplanung und einer automatisierten, rechnergestützen DOE-Planung (design of experiments) miteinander verglichen. Da bei den DOE-Varianten keine Vorteile bzgl. Anzahl der Versuche oder der statistischen Aussagekraft erreicht werden können, wird die Versuchsplanung manuell erstellt. Hierbei werden die meisten Parameter zunächst einzeln untersucht und die Randbedingungen für folgende Versuche aus den jeweiligen bestehenden Ergebnissen abgeleitet. Somit bauen die Versuche aufeinander auf. Bei Bedarf können einzelne Kombinationsversuche abschließend bestimmte Fragestellungen klären.

Die untersuchten Temperaturen der Rückwand (T_RW) liegen zwischen 100 und 500 °C und orientieren sich mit nach oben und unten ausgeweiteten Grenzen an den an realen Brennern gemessenen Temperaturen – im Bereich der Rückwand zwischen etwa 250 und etwa 400 °C. Die Schrittweite von 100 °C wird gewählt, da dies bei dem zu erwartenden stetigen Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Ablagerungsmenge eine ausreichende Auflösung darstellt.

Die minimale Temperatur des Gasstroms, der auf die flammseitige Verdampferoberfläche trifft, (T_FS) wird mit 400 °C festgelegt, da darunter in Vorversuchen kaum mehr vollständige Verdampfung beobachtet wird. Mit 800 °C als maximale Temperatur liegt der Gasstrom im Bereich der höchsten, in entsprechenden Experimenten an Brennern ermittelten Temperaturen im Bereich der Verdampferoberfläche. Die Schrittweite von 100 °C wird auch hier aus den oben genannten Gründen gewählt.

Ausgehend von der Verdampfungsleistung des Prüfstandes, siehe S. 10, wird ein maximaler Brennstoffvolumenstrom von 115 ml/h festgelegt. Dies entspricht einer Dosierpumpen-Förderfrequenz von 1,0 Hz. Eine zweite Stützstelle wird mit 0,25 Hz und damit einem Volumenstrom von 28,75 ml/h definiert. Der Spreizungsfaktor der Brennstoff-Förderrate und damit der virtuellen Heizleistung beträgt somit vier.

Als zu untersuchende Brennstoffe werden sowohl Otto- als auch Dieselkraftstoffe ausgewählt. Als Basis-Komponenten ohne biogene Anteile wird ein FAME-freier Diesel nach DIN EN 590 in Winterqualität beschafft sowie ein Ottokraftstoff nach DIN EN 228 in der Qualität Super Plus. Da es sich beim Benzin um handelsübliche Tankstellenware handelt, sind sauerstoffhaltige Verbindungen zur Oktanzahlerhöhung wie

Methyl-tert-butylether (MTBE) oder Ethyl-tert-butylether (ETBE) enthalten. Entsprechende Analysen bestätigen, dass praktisch kein FAME bzw. Ethanol in den Basis-Kraftstoffen enthalten ist.

Ausgewählte biogene Treibstoffkomponenten umfassen die einwertigen Alkohole Ethanol, Methanol und 1-Butanol bei den Ottokraftstoffen. Bei den Dieselblends werden Beimischungen von Biodiesel (FAME) nach DIN EN 14214 aus Rapsöl (RME), Palmöl (PME) und Sojaöl (SME) und damit voneinander abweichender Fettsäureverteilung untersucht. Zudem werden vollständig hydrierte Pflanzenöle (HVO) und stichprobenartig auch die Beimischung von unverändertem Pflanzenöl aus Raps (PfÖl) getestet.

Die aufgestellte Brennstoffmatrix für die Evaluation des Brennstoffeinflusses soll möglichst umfassend derzeit markttypische Kraftstoffe abbilden sowie potentielle zukünftige teil-regenerative Mischungen sowie vollständig biogene Treibstoffe enthalten, siehe Tabelle 1 und Tabelle 2. Beimischungen sind stets in Volumenprozent angegeben.

Tabelle 1: Ausgewählte Dieselkraftstoff-Blends

Bezeichnung	Beschreibung
B0	mineralölstämmiger Dieselkraftstoff
B7 (RME)	7% RME
B7 (PME)	7% PME
B7 (SME)	7% SME
B30 (RME)	30% RME
B30 (PME)	30% PME
B30 (SME)	30% SME
B50 (RME)	50% RME
B50 (PME)	50% PME
B50 (SME)	50% SME
B100 (RME)	100% RME
B100 (PME)	100% PME
B100 (SME)	100% SME
R33 (RME)	7% RME, 26% HVO
R33 (PME)	7% PME, 26% HVO
H10	10% HVO
H50	50% HVO
H100	100% HVO
PfÖl5	5% Rapsöl

Tabelle 2: Ausgewählte Ottokraftstoff-Blends

Bezeichnung	Beschreibung
E0	mineralölstämmiger Ottokraftstoff
E5	5% Ethanol
E10	10% Ethanol
E25	25% Ethanol
E50	50% Ethanol
E85	85% Ethanol
E100	100% Ethanol
M25	25% Methanol
M50	50% Methanol
M100	100% Methanol
B10	10% Butanol
B25	25% Butanol
B100	100% Butanol

Die Mischungen B7 (RME), B100 (RME) und E10 stellen hierbei die Referenz zu Versuchen an realen Heizgeräten dar, da diese Brennstoffe typischerweise in Lebensdauertests von Brennern bei Webasto Verwendung finden.

Der Einfluss der Verdampfereigenschaften auf die Rückstandsbildung wird durch Variation der porösen Medien evaluiert, siehe Tabelle 3. Als Standard-Typ und Referenz ist ein Metallfaservlies mit 71% Nennporosität ausgewählt, das in dieser Konfiguration bei mehreren Serien-Geräten von Webasto Verwendung findet. Das identische Material mit verringerter Dicke dient als Muster mit niedrigerer Porosität. Mögliche Effekte durch eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit, wie sie auch im Betrieb eines Brenners entstehen, werden durch eine künstliche Oberflächen-Verzunderung des Standard-Typs unter definierten Bedingungen berücksichtigt. Weitere Modifikationen umfassen den Faserquerschnitt und das Fasermaterial. Bei Drähten als Halbzeug sind zwei unterschiedliche Herstellverfahren mit einem gepressten Gestrick und einem Gelege aus Rechteck-Gewebe vertreten. Ein offenporiger Metallschaum repräsentiert die Klasse der aufgeschäumten metallischen Verdampfer.

Tabelle 3: Ausgewählte Verdampfermaterialien

Bezeichnung	Beschreibung
Metallfaservlies, Standard	Gesinterte Metallfasermatte aus Endlossträngen, Material 1.4841, Nennporosität 71%
Metallfaservlies, niedrige Porosität	Gesinterte Metallfasermatte aus Endlossträngen, Material 1.4841, Nennporosität 61%
Metallfaservlies, verzundert	Gesinterte Metallfasermatte aus Endlossträngen, Material 1.4841, Nennporosität 71%, künstlich unter Luftatmospähre verzundert
Metallfaservlies, reduzierter Faserquerschnitt	Gesinterte Metallfasermatte, Faserquerschnitt etwa 50% von Standard-Metallfaservlies, Material 1.4767, Nennporosität 74%
Metalldrahtgestrick	Gepresste Scheibe aus Metalldrahtgestrick, Material 1.4841, Nennporosität 68%
Metalldrahtgewebe	Gesinterte Scheibe aus 32 Lagen Metalldrahtmaschengewebe, Material 1.4841, Nennporosität 65%
Mineralfaservlies	Vlies aus mineralischen Fasern, Nennporosität 81%
Metallschaum	offenporiger Metallschaum, Nenn-Porosität 77%, Material NiCrAl

In Vorversuchen wird zunächst ohne Betrachtung der Ablagerungsbildung die Verdampfungsleistung des Prüfstandes bewertet. Als Verdampfer wird in allen Tests ein Standard-Metallfaserverdampfer verwendet. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, ist eine vollständige Verdampfung bei allen untersuchten Brennstoffen und Massenströmen umsetzbar. Insbesondere bei den höhersiedenden Brennstoffen ist die Verdampfungskapazität bei niedrigen Temperatur-Kombinationen wie zu erwarten eingeschränkt. Die fehlende Möglichkeit einer aktiven Kühlung der Rückwand bedingt, dass bei bestimmten Betriebspunkten die eingestellte Soll-Temperatur überschritten wird, was aber in der Ergebnis-Auswertung berücksichtigt werden kann. Wegen der unbekannten Menge an flüssigem Restbrennstoff im Verdampfer sind Versuche mit unvollständiger Verdampfung dagegen nicht für die Bewertung der Ablagerungsmenge geeignet. Diese Temperaturkombinationen werden mit einem gewissen Sicherheitsabstand in den späteren Versuchen gemieden.

Die erste Versuchsreihe bewertet mittels Variation der Versuchsdauer (Brennstoffförderzeit) den Einfluss der umgesetzten Brennstoffmenge bzw. des Wirk-Zeitraums. Untersucht werden die Referenz-Kraftstoffe Diesel B7 (RME) und Benzin E10. Die eingestellten Soll-Temperaturen liegen für Diesel bei 600 °C flammenseitiger Temperatur und 300 °C Rückseitentemperatur. Beim Ottokraftstoff wird die Kombination 400 und 100 °C entsprechend gewählt. In allen Fällen beträgt der Brennstoffvolumenstrom 28,75 ml/h und es kommen Standard-Metallfaservliese zum Einsatz. Unter diesen Randbedingungen ist eine vollständige Verdampfung sichergestellt und die Bedingungen in real betriebenen Brennern werden hinreichend repräsentiert. Um die Reproduzierbarkeit quantifizieren zu können, werden bestimmte Versuche mehrmals wiederholt, siehe Abbildung 4 und Abbildung 5.

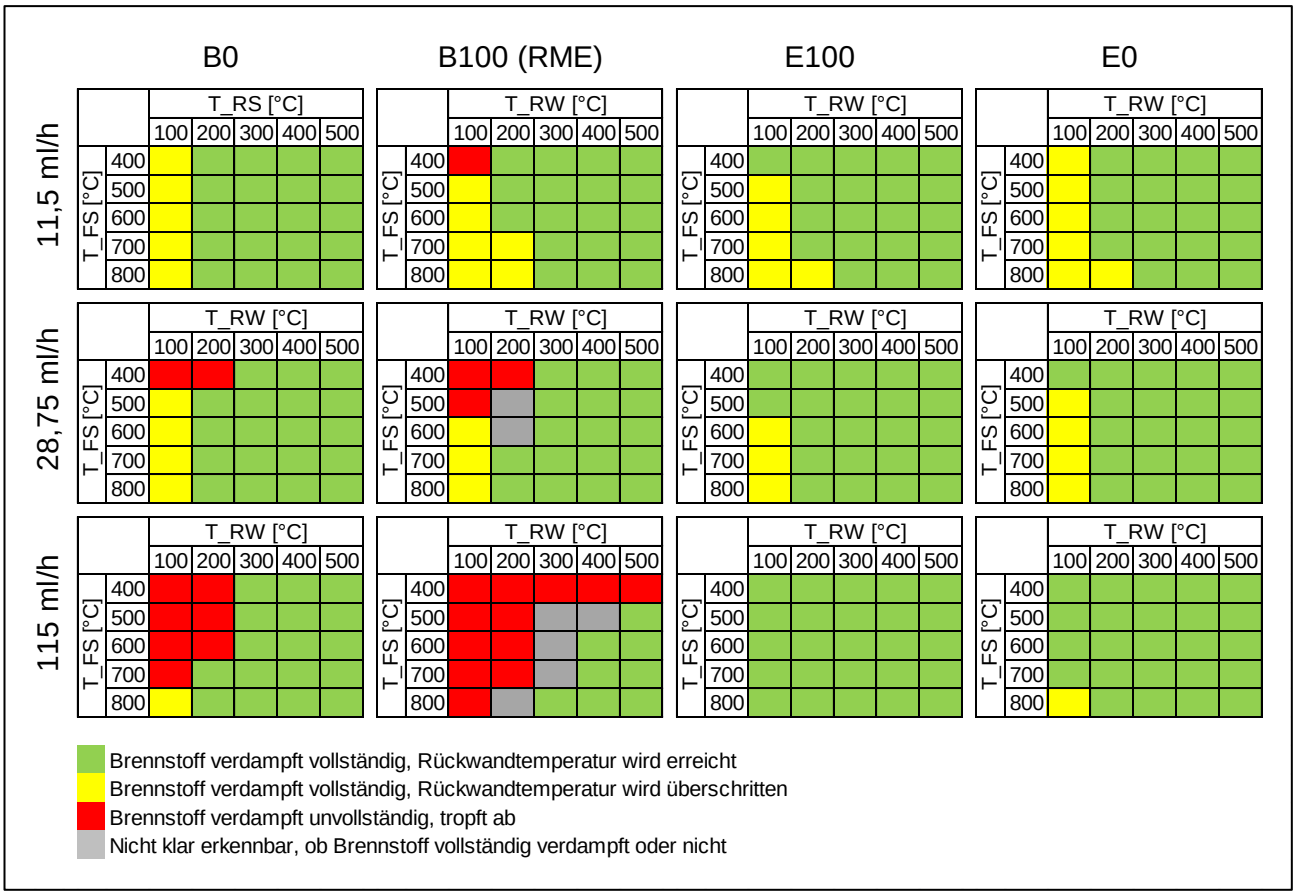


Abbildung 3: Verdampfungsleistung des Prüfstandes mit unterschiedlichen Brennstoffen und Massenströmen bei verschiedenen Kombinationen der Temperatur der Flammenseite (T_FS) und der Rückseite (T_RW)

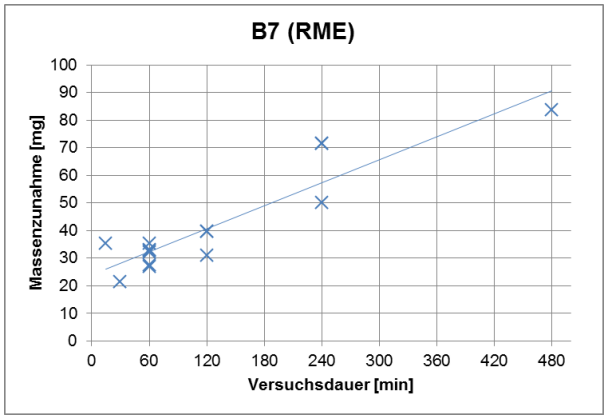


Abbildung 4: Abhängigkeit der Massenzunahme der Verdampfer von der Dauer (Brennstoffförderphase) des Versuchs bei Diesel B7 (RME)

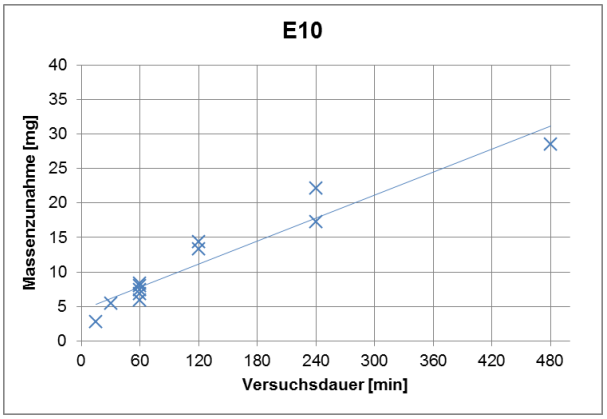
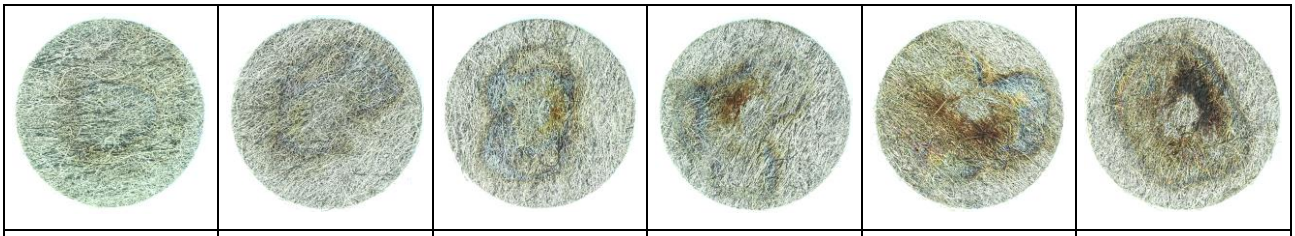


Abbildung 5: Abhängigkeit der Massenzunahme der Verdampfer von der Dauer (Brennstoffförderphase) des Versuchs bei Benzin E10

Der Einfluss der Versuchsdauer erscheint im untersuchten Bereich einen weitestgehend linearen Zusammenhang mit der Massenzunahme aufzuweisen. Die in den Diagrammen eingezeichnete Linie entspricht jeweils einer linearen Interpolation aller Datenpunkte. Da bereits bei 60 Minuten Brennstoffförderzeit relevante und gut reproduzierbare Massenzunahmen zu verzeichnen sind, wird diese Dauer für die folgenden Versuche als Standard-Versuchsdauer gewählt. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse stellt bei 60 Minuten Versuchsdauer mit einem Variationskoeffizienten von rund 10 % bei Diesel

B7 (RME) und rund 13 % bei Benzin E10 einen für derartige Versuche zufriedenstellenden Wert dar. Da die erwartete Größenordnung des Einflusses der zu untersuchenden Randbedingungen deutlich über diesem Grundrauschen liegt, ist in den folgenden Versuchsreihen von aussagekräftigen Ergebnissen auszugehen.

Ein optischer Vergleich der Verdampfer nach den Versuchen zeigt bereits oberflächlich und makroskopisch die unterschiedlichen Ablagerungsmengen, siehe Abbildung 6.



15min	30min	60min	120min	240min	480min

Abbildung 6: Rückseitige Oberfläche von getesteten Verdampfern nach Versuchsende mit Diesel B7 (RME) bei unterschiedlichen Versuchslaufzeiten (Brennstoffförderphase)

In der folgenden Versuchsreihe wird der Einfluss der flammseitigen Temperatur, der Rückwandtemperatur und des Brennstoffvolumenstroms auf die Rückstandsmenge untersucht. Als Vertreter aller möglichen Brennstoffmischungen werden Diesel B7 (RME), Biodiesel B100 (RME) und Benzin E10 aufgrund ihrer Feldrelevanz und der umfangreichen vorhandenen Datenbasis ausgewählt. Die getesteten Temperaturkombinationen decken das, durch die vollständige Verdampfung definierte Versuchsfeld gleichmäßig ab. Alle Versuche werden mit dem als Standard definierten Metallfaservlies und einer Versuchsdauer von 60 Minuten durchgeführt.

In der anschließenden Ergebnisdarstellung sind im jeweils linken Diagramm die Einzelwerte der ermittelten Massenzunahmen der Verdampfer gezeigt, im rechten Diagramm die berechnete zweidimensionale Interpolation der Werte (Abbildung 7 bis Abbildung 12).

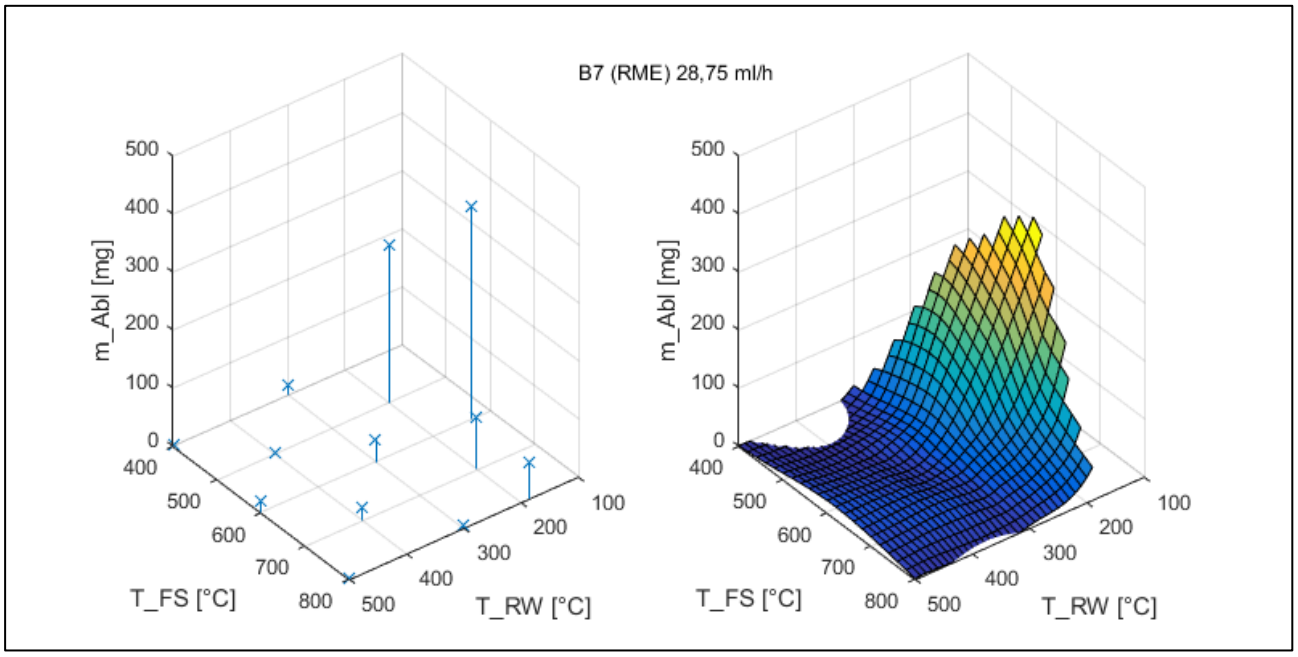


Abbildung 7: Abhängigkeit der Ablagerungsmasse (m_Abl) von der Temperatur der Flammenseite (T_FS) und der Temperatur der Rückwand (T_RW) bei Diesel B7 (RME) und 28,75 ml/h Brennstoffvolumenstrom

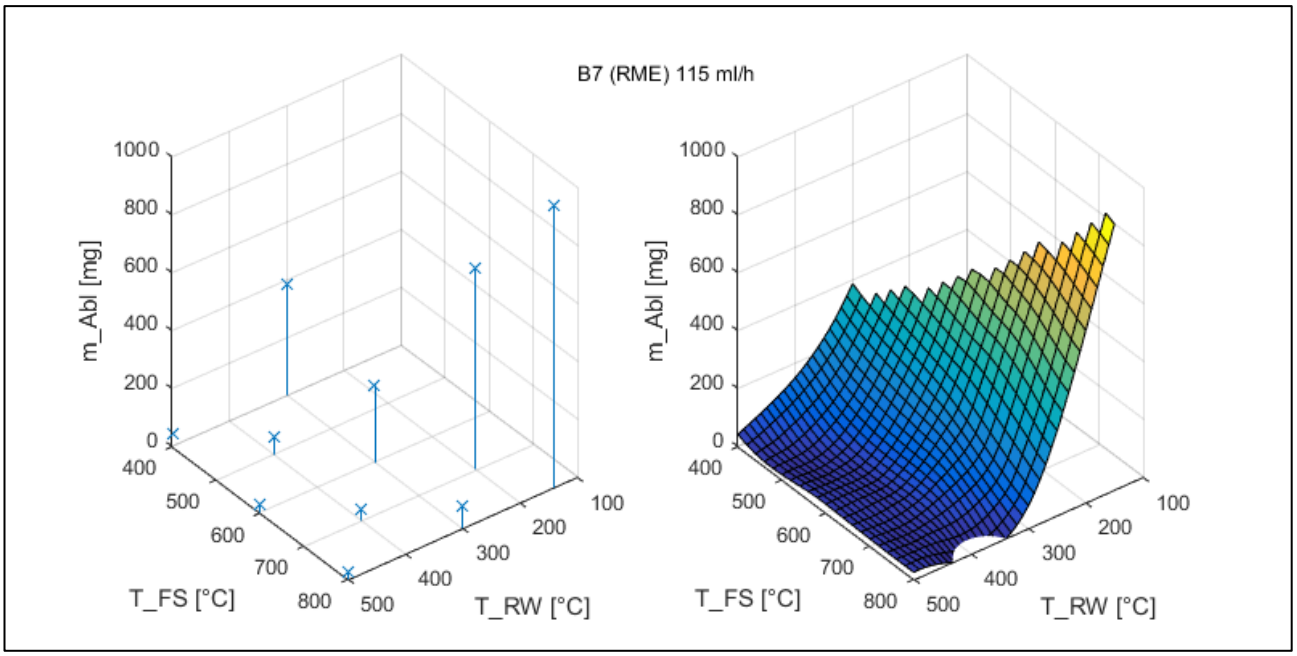


Abbildung 8: Abhängigkeit der Ablagerungsmasse (m_Abl) von der Temperatur der Flammenseite (T_FS) und der Temperatur der Rückwand (T_RW) bei Diesel B7 (RME) und 115 ml/h Brennstoffvolumenstrom

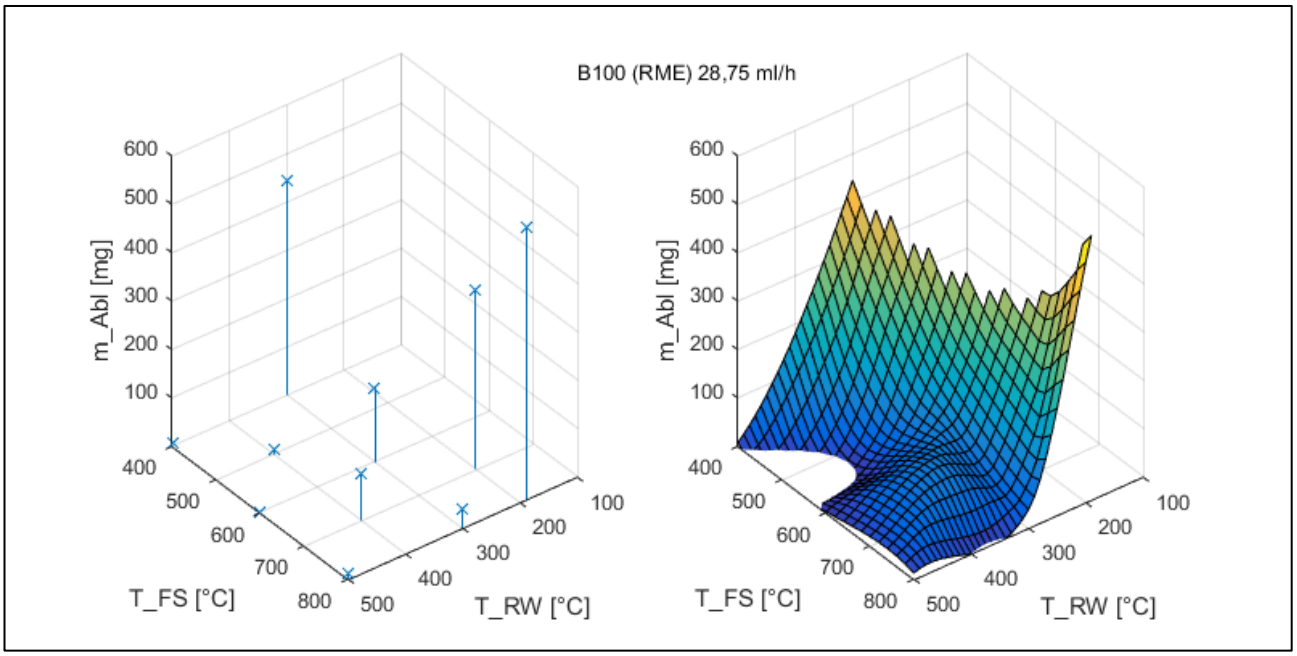


Abbildung 9: Abhängigkeit der Ablagerungsmasse (m_Abl) von der Temperatur der Flammenseite (T_FS) und der Temperatur der Rückwand (T_RW) bei Biodiesel B100 (RME) und 28,75 ml/h Brennstoffvolumenstrom

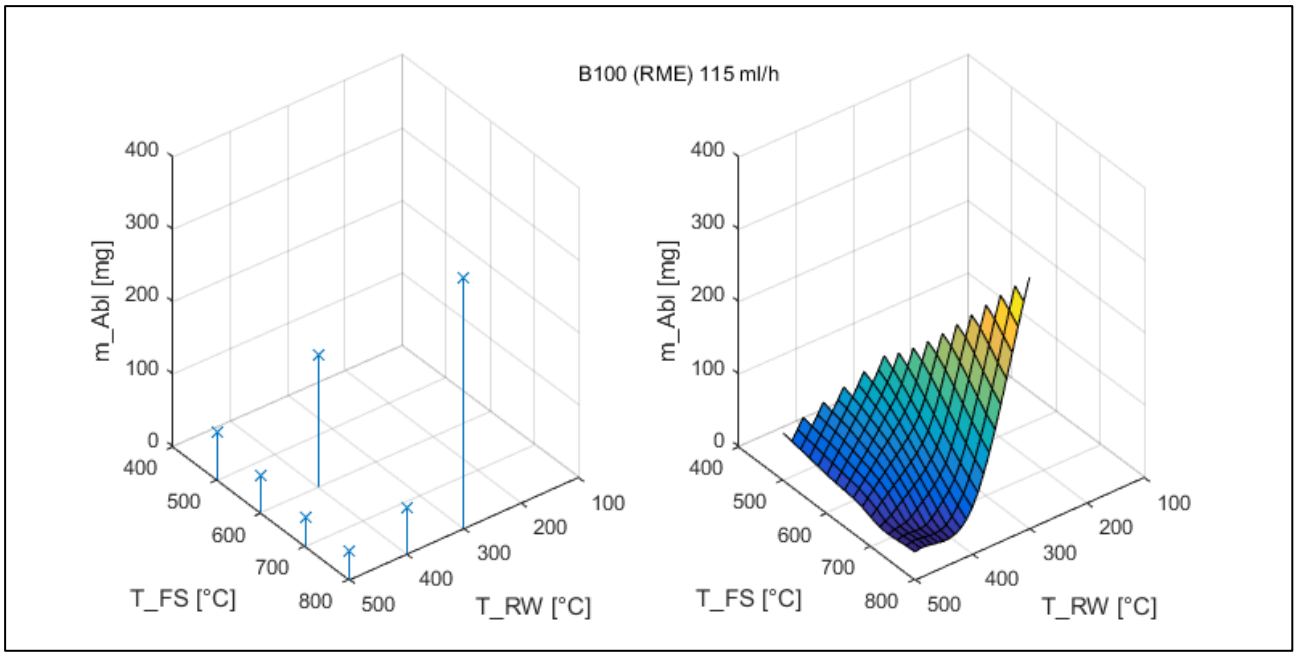


Abbildung 10: Abhängigkeit der Ablagerungsmasse (m_Abl) von der Temperatur der Flammenseite (T_FS) und der Temperatur der Rückwand (T_RW) bei Biodiesel B100 (RME) und 115 ml/h Brennstoffvolumenstrom

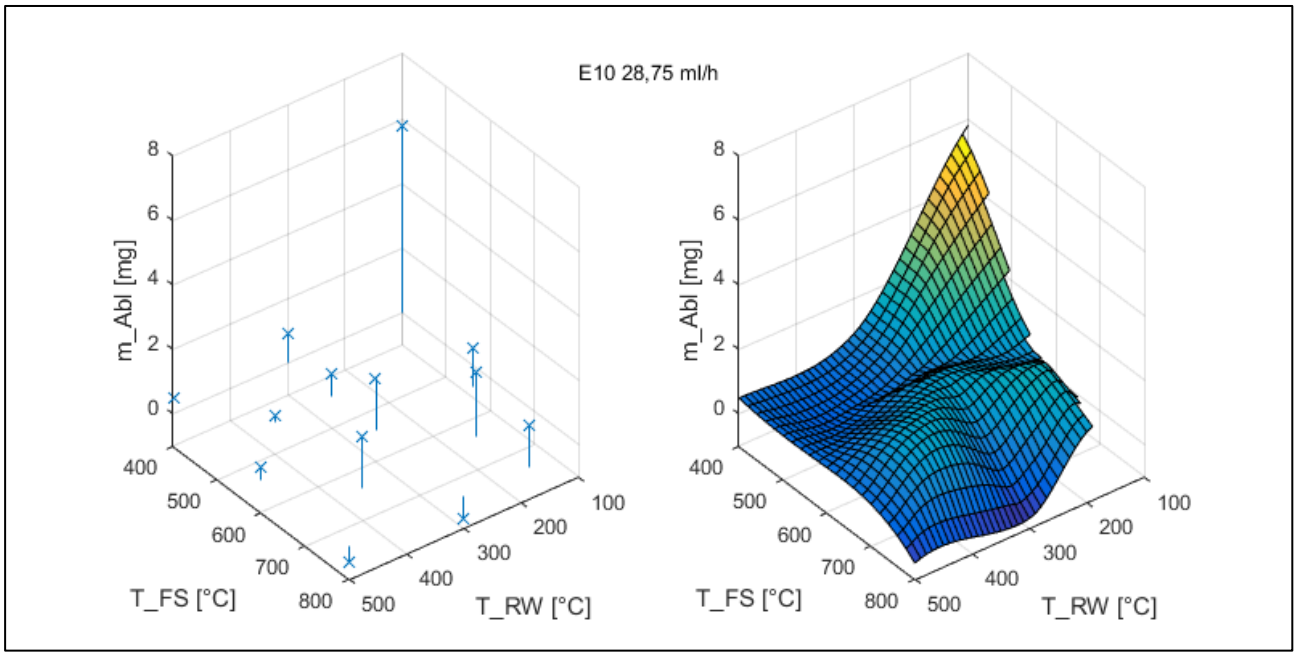


Abbildung 11: Abhängigkeit der Ablagerungsmasse (m_Abl) von der Temperatur der Flammenseite (T_FS) und der Temperatur der Rückwand (T_RW) bei Benzin E10 und 28,75 ml/h Brennstoffvolumenstrom

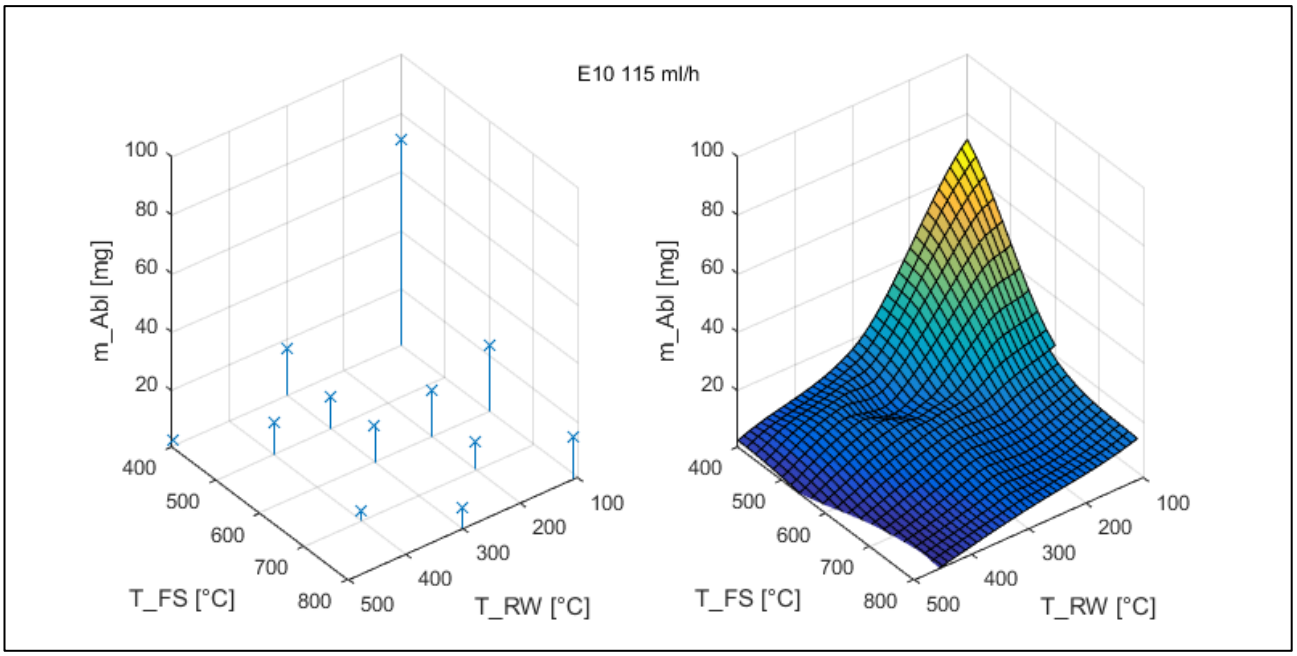


Abbildung 12: Abhängigkeit der Ablagerungsmasse (m_Abl) von der Temperatur der Flammenseite (T_FS) und der Temperatur der Rückwand (T_RW) bei Benzin E10 und 115 ml/h Brennstoffvolumenstrom

Die tendenzielle Zunahme der Rückstände im Verdampfer bei sinkenden Temperaturen ist bei allen Versuchsreihen erkennbar.

Bei den Dieselkraftstoffen B7 und B100 hat die Temperatur der Rückwand signifikanten Einfluss auf die Ablagerungsmenge während die flammseitige Temperatur, speziell bei ausreichender Rückwandtemperatur, nur eine untergeordnete Rolle spielt (Abbildung 7 bis Abbildung 10). Im Fall von B7 und 0,25 Hz Dosierpumpenfrequenz kommt es erst unterhalb von 300 °C Rückwandtemperatur zu einem wesentlichen Anstieg der Ablagerungsmenge. Die Erhöhung des Brennstoffmassenstroms und der Einsatz eines reines FAME führen scheinbar zu einem Anstieg dieser „Sprungtemperatur“. In dieser Richtung ist generell eine Zunahme der absoluten Ablagerungsmengen zu beobachten. Als Mechanismus hinter der Rückstandsbildung ist in diesem Fall zunächst das Zurückbleiben von Schwersiedern in den kältesten Bereichen des Vlieses im Bereich der Rückwand zu vermuten. Wird hier eine gewisse Mindesttemperatur erreicht, fällt die Menge der nicht verflüchtigten Komponenten auf nahezu null ab. Diese Schwelle korreliert in etwa mit der Siedeendtemperatur des eingesetzten Kraftstoffs. Da neben der geregelten Temperatur der Rückwand auch die Verdampfungsenthalpie des Brennstoffs Einfluss auf das Temperaturniveau und die Temperaturverteilung im Verdampfer besitzt, hat der Brennstoffvolumenstrom Auswirkung auf die Lage dieser Mindesttemperatur.

Beim Ottokraftstoff Benzin E10 liegen die absoluten Massenzunahmen der Verdampfer deutlich unter denen der Versuche mit den Dieselvarianten (Abbildung 11 und Abbildung 12). Während bei beiden untersuchten Brennstoffvolumenströmen in einem weiten Temperaturbereich von den mittleren bis zu den maximalen Werten ein gewisses Grundrauschen auf niedrigem Niveau, teilweise im Bereich der Nachweisgrenze, zu beobachten ist, kommt es in allen Fällen zu einer starken Zunahme der Rückstände bei Kombination der jeweiligen Temperaturminima. Ein reines Zurückbleiben von Schwersiedern der Benzinfraktion kommt hier nicht in Frage, da sich diese durch Verdunstung spätestens in der Nachlaufphase des Versuchs weitestgehend verflüchtigen müssten. Gegen eine Aufkonzentrierung von Additiv-Komponenten spricht die Größe der Massenzunahme, da Additive in handelsüblichen Kraftstoffen typischerweise in minimalen Konzentrationen vorliegen. Eine zumindest partielle chemische Reaktion der Kohlenwasserstoffspezies aus dem Basiskraftstoff ist daher anzunehmen.

Der Einfluss des Anteils an biogenen Komponenten im Brennstoff und deren Zusammensetzung wird in einer weiteren, unabhängigen Versuchsreihe evaluiert. Variiert wird lediglich der Brennstofftyp entsprechend der ausgewählten Brennstoffmatrix, siehe Tabelle 1 und Tabelle 2. Die Temperaturen und Volumenströme werden je Brennstoffklasse (Diesel- bzw. Ottokraftstoffe) zuvor so festgelegt, dass in allen Fällen eine

vollständige Verdampfung sichergestellt ist. Für Diesel-Kraftstoffe wird eine Flammseitentemperatur von 600 °C und eine Rückwandtemperatur von 300 °C bei 28,75 ml/h Brennstoffvolumenstrom festgelegt. Zwar wäre auch bei höheren Volumenströmen eine vollständige Verdampfung umsetzbar, allerdings konnte bei 115 ml/h in ersten Versuchen keine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden. Bei Ottokraftstoffen wird ebenfalls die Temperaturkombination 600 °C / 300 °C gewählt, allerdings bei 115 ml/h Brennstoffvolumenstrom, da hier die geforderte Reproduzierbarkeit erreichbar ist und speziell bei Benzin der hohe Brennstoffeintrag für signifikante absolute Ablagerungsmassen erforderlich ist, siehe oben. Der Verdampfertyp ist in allen Fällen ein Standard-Metallfaservlies, die Versuchsdauer beträgt 60 Minuten.

Die in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen jeweils die Massenzunahme der Verdampfer über den Volumenanteil biogener Anteile im rein fossilen Basis-Kraftstoff. Die unterschiedlichen Datenreihen repräsentieren die verschiedenen Biokraftstoff-Arten. Eingezeichnete Linien stellen die lineare Interpolation zwischen allen Datenpunkten der jeweiligen Datenreihe ausgeschlossen den Werten für 0 vol% biogene Anteile dar.

Bei den Diesel-Blends führt die Beimischung von FAME zu einer Zunahme der Ablagerungsbildung. Je nach Feedstock und damit Fettsäureverteilung ist diese Zunahme mehr oder weniger stark ausgeprägt. Im Fall von Sojamethylester (SME) führt der Austausch von rein fossilem Diesel durch reines FAME zu einer Versechsfachung der Ablagerungsmenge. Hydriertes Pflanzenöl (HVO) als Beimischung zu mineralölstämmigem Diesel verhält sich weitestgehend neutral in Bezug auf die Rückstandsbildung. Die Brennstoffe des R33-Typs liegen etwa auf dem Niveau von B0 oder B7, was zu erwarten ist, da die 26 vol% HVO-Anteil nicht zu einer nennenswerten Änderung der Ablagerungsmenge führen und lediglich die sieben Prozent FAME für eine Zunahme der Rückstände zur Verfügung stehen.

Diese Ergebnisse entsprechen im Wesentlichen den vorhandenen Erfahrungen aus der Praxis, bei denen mangels Datengrundlage der lineare Zusammenhang zwischen Rückständen und FAME-Gehalt bislang allerdings nur vermutet werden konnte. Der Einfluss der Fettsäureverteilung auf die Funktion von Heizgeräten ist ebenfalls häufig beobachtet worden, was durch diese Ergebnisse bestätigt wird. Da vermutlich die Reaktivität der Fettsäureester durch deren Doppelbindungen die wichtigste Ursache für die Ablagerungsbildung von FAME darstellt, ist die höchste Rückstandmenge in den Versuchen bei Sojamethylester als Blendkomponente nachvollziehbar, da diese den größten Anteil ungesättigter Verbindungen enthält.

Im Fall der HVO-Beimischungen wäre aufgrund des begrenzten Siedebereichs und dem Fehlen von Aromaten eine deutliche Abnahme der Rückstände bei steigender Zumischung zu erwarten. Die dem Diesel B0 ähnliche Massenzunahme ist zunächst nicht erklärbar.

Unter den genannten Bedingungen wird ebenfalls der in der Brennstoffmatrix vorgesehene Brennstoff PfÖl5, also eine fünfprozentige Beimischung von raffiniertem Rapsöl zu fossilem Diesel, getestet. Aufgrund der hohen Massenzunahme von 430,9 mg ist dieses Ergebnis in der Grafik nicht dargestellt. Hier kommt es möglicherweise zu einer thermisch induzierten Fettsäurespaltung mit anschließender Reaktion der ungebundenen hochreaktiven Komponenten. Erkenntnisse bei Standheizungen mit Diesel, der mit unverändertem Pflanzenöl verunreinigt wurde, bestätigen dieses Bild.

Ottokraftstoffe scheinen durch Blending mit Alkoholen im untersuchten Fall generell eine niedrigere Ablagerungsneigung aufzuweisen. Unter Berücksichtigung der Streuung der Ergebnisse bei Benzin E0 ist eine weitestgehend proportionale Abnahme der Rückstände mit zunehmendem Biokraftstoff-Gehalt zu erkennen, ein Unterschied zwischen den Alkoholarten ist nicht zuverlässig ableitbar. Chemisch ist aufgrund der hohen Flüchtigkeit der Alkohole und deren eingeschränkter Reaktivität auch kein Verbleiben im Verdampfer zu erwarten. Eine erkennbare Wechselwirkung mit dem fossilen Basiskraftstoff findet nicht statt.

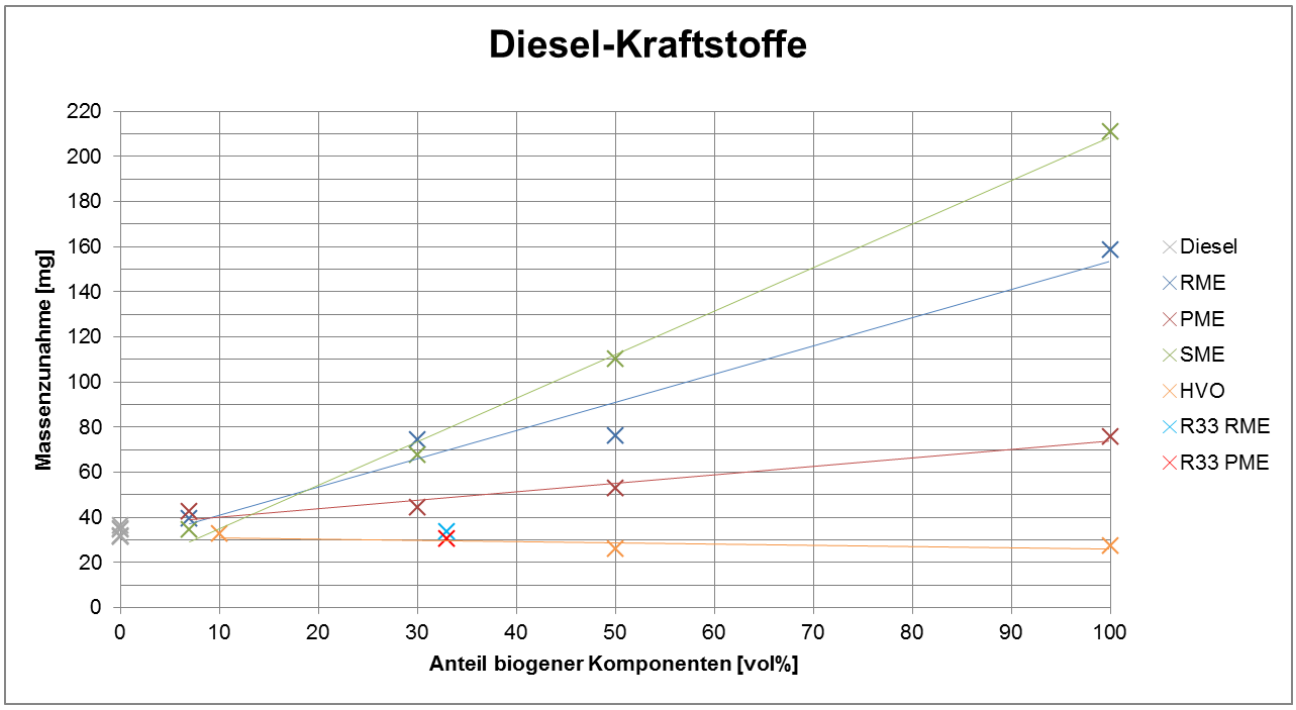


Abbildung 13: Einfluss der Beimischung unterschiedlicher biogener Komponenten zu fossilem Diesel auf die Ablagerungsbildung im Verdampfer

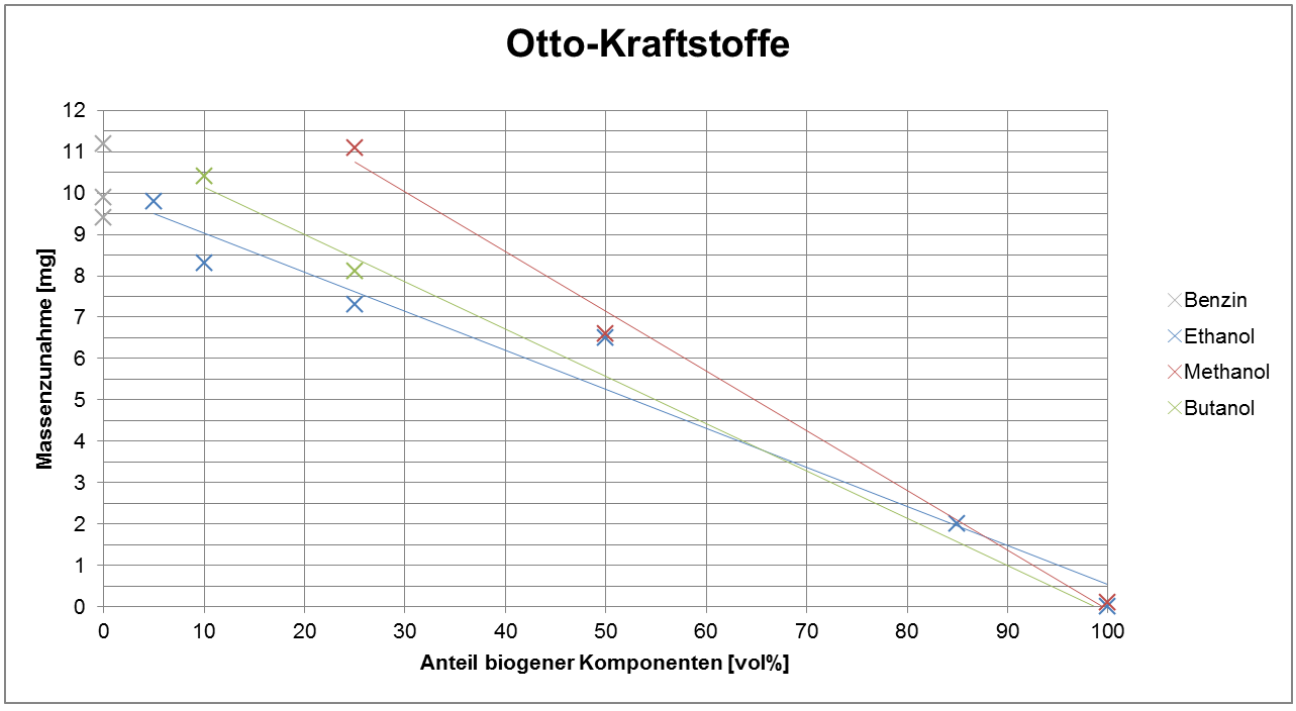


Abbildung 14: Einfluss der Beimischung unterschiedlicher biogener Komponenten zu fossilem Otto-Kraftstoff auf die Ablagerungsbildung im Verdampfer

Abschließend und unter Verwendung der bisherigen Versuchsergebnisse evaluiert eine Versuchsreihe den Einfluss der Eigenschaften des porösen Mediums auf die Ablagerungsbildung, siehe Abbildung 15 und Abbildung 16. Gewählt wird für die Klasse der Dieselkraftstoffe ein Diesel B7 (RME) bei einem Brennstoffvolumenstrom von 28,75 ml/h mit einer Flammseitentemperatur von 600 °C und einer

Rückwandtemperatur von 300 °C. Für die Ottokraftstoffe steht stellvertretend ein Benzin E10 bei identischer Temperaturkombination und einem Brennstoffvolumenstrom von 115 ml/h, siehe auch weiter oben.

Auffallend bei den Versuchen mit Diesel B7 ist die geringe Abhängigkeit der Ablagerungsmenge von den Eigenschaften des porösen Mediums. Lediglich beim Mineralfaservlies ist mit einer Massenzunahme von 389,7 mg ein bedeutender Einfluss feststellbar. Der Datenpunkt ist im Diagramm aufgrund der gewählten Skalierung nicht dargestellt.

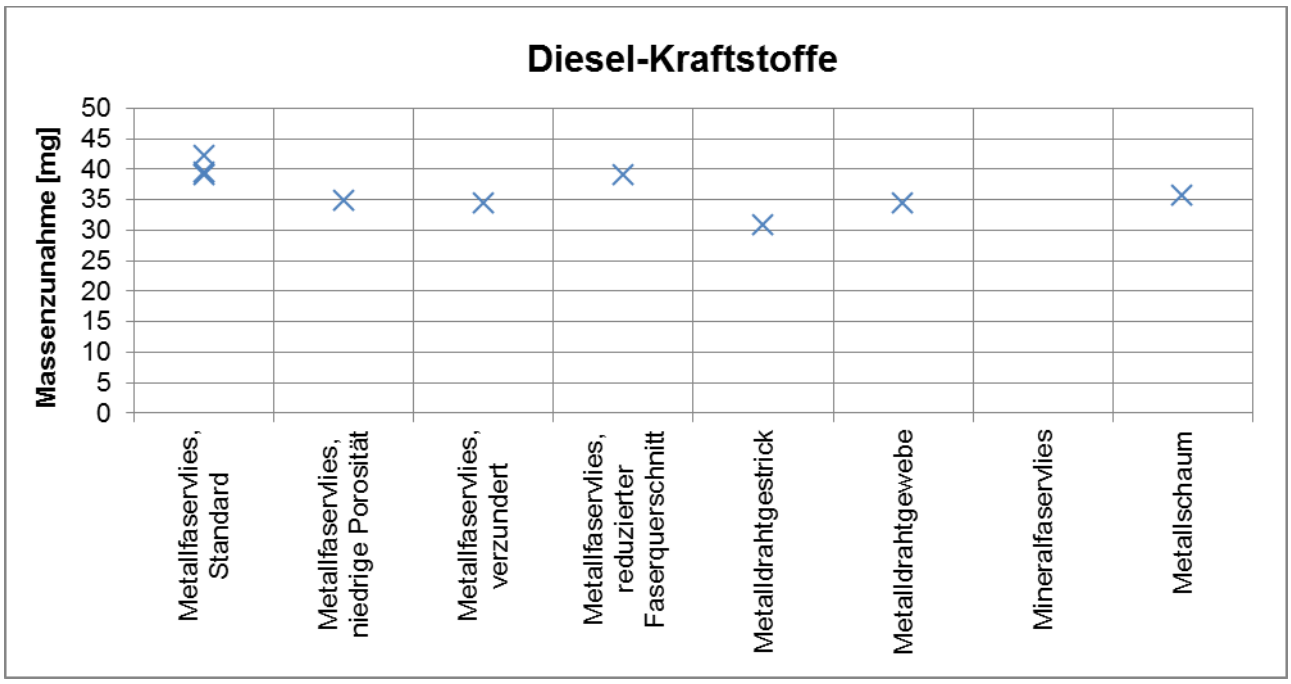


Abbildung 15: Einfluss des porösen Mediums auf die Ablagerungsbildung im Verdampfer bei Dieselkraftstoff B7 (RME)

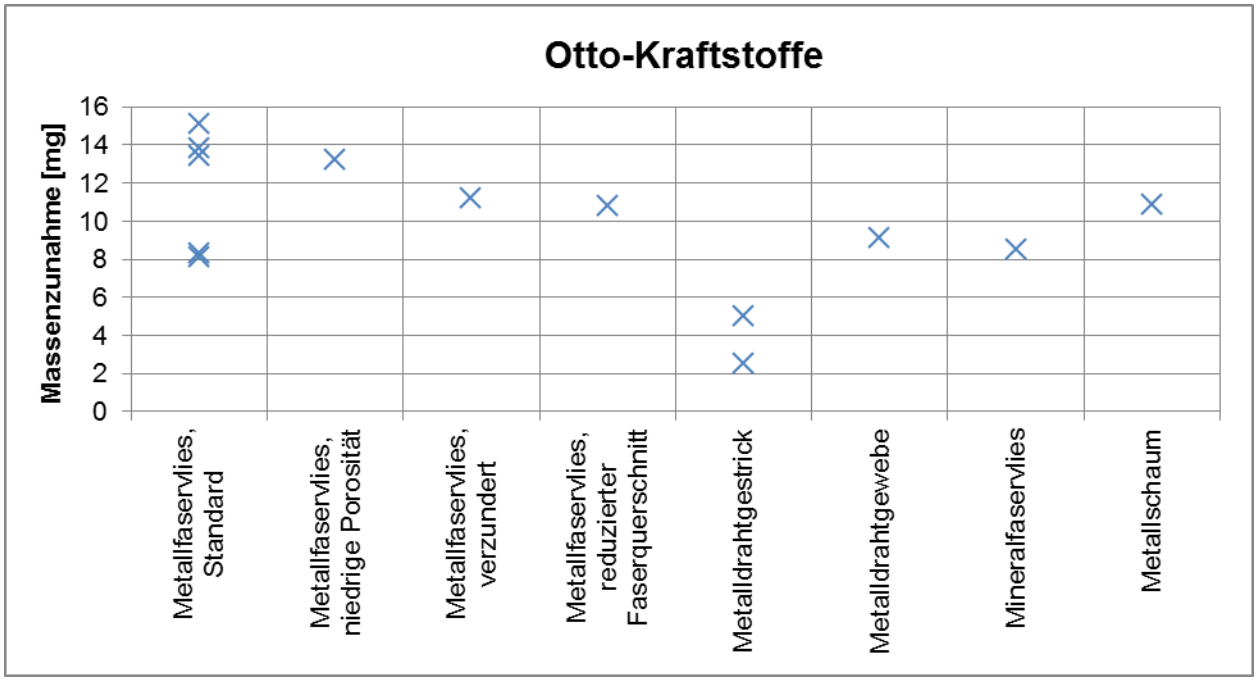


Abbildung 16: Einfluss des porösen Mediums auf die Ablagerungsbildung im Verdampfer bei Ottokraftstoff E10

Beim Ottokraftstoff sind zwar größere relative Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Medien vorhanden, die sich aufgrund der Streuungsbreite der Ergebnisse aber nicht für eine zuverlässige Differenzierung eignen. Vielmehr ist auch hier der Einfluss des Verdampfers auf die Ablagerungsbildung als gering anzusehen. Im Fall des Metalldrahtgestricks könnte tatsächlich ein Minimum der Massenzunahme bestehen, was in einen Wiederholungsversuch bestätigt werden kann. Für eine zuverlässige Quantifizierung sind weitere Versuche mit einem höheren Prüfumfang notwendig.

Der geringe Einfluss des Verdampfers auf die Ablagerungsbildung konnte auch in einzelnen Versuchen an realen Heizgeräten bereits beobachtet werden. Diese Testreihe belegt aber erstmals, dass auch bei starker Variation der Parameter des porösen Mediums nicht zwingend ein Effekt auf die Rückstandbildung auftreten muss. Chemische oder katalytische Vorgänge an den Grenzflächen zwischen Verdampfer und Brennstoff sind demnach nicht oder nur untergeordnet von Bedeutung. Auch ist eine veränderte Wärmeleitfähigkeit des Verdampfermaterials und damit eine Verschiebung der Temperaturverteilung nicht immer ausschlaggebend für die Gesamtmenge an Rückständen. Im Fall des Mineralfaservlieses und Diesel könnte allerdings genau diese stark eingeschränkte Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit einer hohen Kapillarität des Materials zu einer Einlagerung von Brennstoff über das Versuchsende hinaus führen, die in der hohen Massenzunahme resultiert. Die Ursache für die minimale Rückstandsmenge bei Verdampfung von Benzin in einem Metalldrahtgestrick ist derzeit nicht bekannt, könnte aber in der geringen spezifischen Oberfläche eines Drahtgestricks begründet liegen.

Wird das Gewicht der getesteten Verdampfer über einen längeren Zeitraum nach dem Ende des jeweiligen Versuchs durch regelmäßige Nachwiegungen beobachtet, lassen sich bereits erste Erkenntnisse über die Flüchtigkeit und damit die Art der Rückstände ableiten. Wie zuvor beschrieben, werden alle Versuchsmuster nach dem Versuch bei Raumtemperatur und unter Umgebungsatmosphäre aufbewahrt.

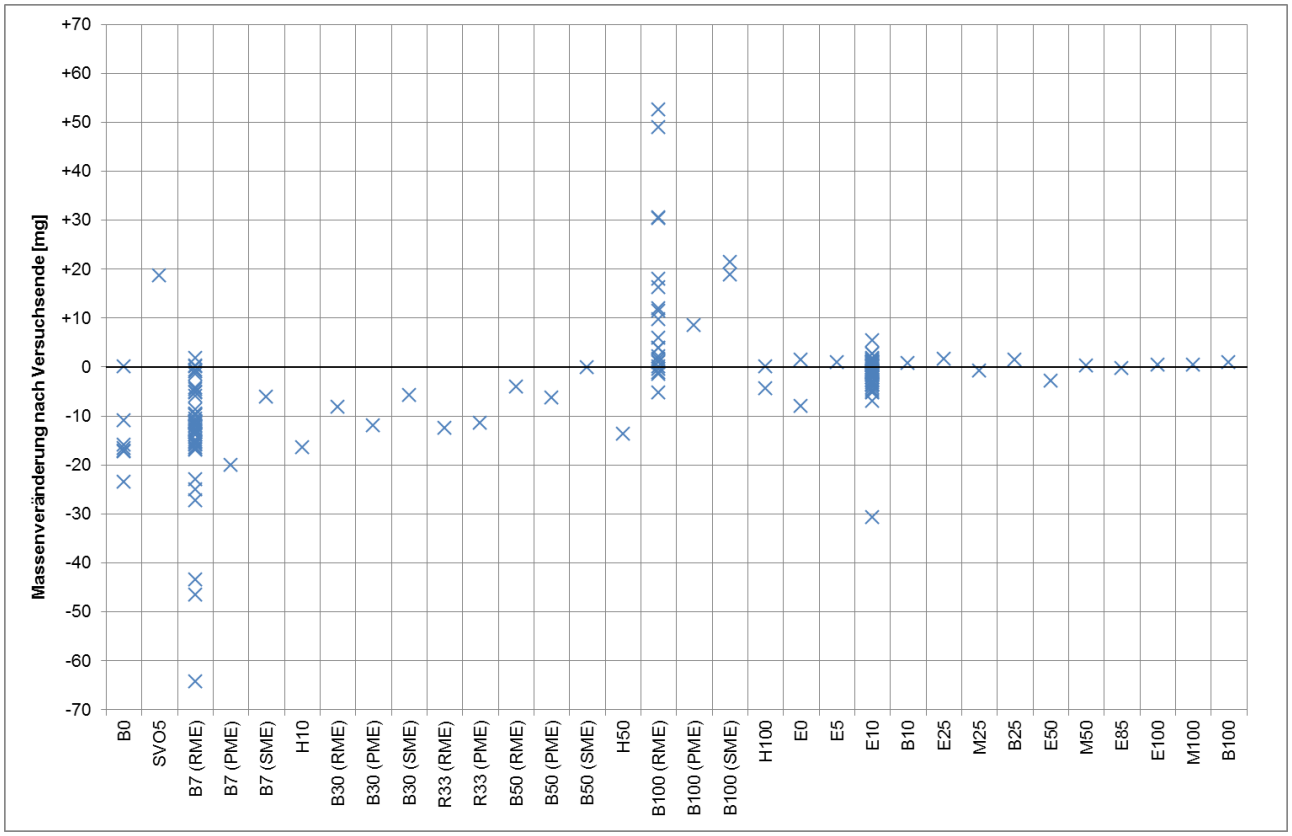


Abbildung 17: Absolute Veränderung des Verdampfergewichts im Zeitraum von bis zu 160 Tagen nach dem Ende des Versuchs

Der beobachtete Zeitraum umfasst, je nach Zeitpunkt des Versuchs, bis zu 160 Tage. Nennenswerte Masseänderungen erfolgen hauptsächlich in den ersten 20 Tagen nach Versuchsende. Danach bleibt das

Verdampfergewicht weitestgehend konstant. Ein vollständiges Verschwinden der Rückstände tritt bei keinem Muster auf, typischerweise liegt die relative Veränderung der reinen Ablagerungsmasse zwischen +35 und -50 %.

Wie in Abbildung 17 dargestellt, ist bei Kraftstoffen, die fossilen Diesel enthalten, eine Abnahme der Ablagerungsmenge zu beobachten, was mit zunehmendem FAME-Anteil geringer ausfällt. Bei reinen Fettsäuremethylestern ist meist eine Zunahme des Gewichts zu verzeichnen. HVO zeigt sich weitestgehend resistent gegenüber masseverändernden Prozessen.

Als Mechanismus hinter der Rückstandsbildung bei dieselartigen Kraftstoffen kommt primär ein Zurückbleiben von hochsiedenden Fraktionen in kühleren Bereichen des Verdampfers in Frage. Die Massenabnahme nach dem Versuchende bei rein fossilem Diesel ist durch Verdunstungsprozesse erklärbar, die Massenzunahme von Rückständen aus reinem FAME durch Oxidation der Fettsäuren. Bei Mischungen zwischen mineralölstämmigem Diesel und Fettsäuremethylester kann es zu einer gegenseitigen Kompensation der beiden gewichtsverändernden Prozesse kommen.

Ottokraftstoffe bilden, auch mit Alkohol-Anteilen, ebenfalls zeitlich beständige Massenzunahmen. Ein Zurückbleiben von unveränderten Schwersiedern aus der fossilen Benzinfraktion ist eher auszuschließen, da bereits bei Raumtemperatur eine nahezu vollständige Verdunstung des eingesetzten Kraftstoffs zu erwarten wäre. Die 15-minütige Nachlaufphase im Versuchsablauf mit fortgesetzter Stickstoff-Spülung ist nicht in der Lage, diese Residuen zu entfernen. Voraussetzung für das Auftreten relevanter Rückstands-Massen bei E10 ist demnach entweder eine chemische Veränderung bestimmter Kohlenwasserstoff-Spezies des Benzins oder das Vorhandensein von Verunreinigungen oder Zusatzstoffen wie Additiven. Rein alkoholische Brennstoffe weisen auch direkt nach dem Versuch praktisch keine Rückstände auf und diese Verdampfer erfahren daher auch keine Masseänderung über die Zeit.

Um die chemisch-physikalischen Bildungsmechanismen, die Zusammensetzung und potentielle Abbauprozesse der Rückstände beschreiben zu können, werden ausgewählte Proben aus den Versuchsreihen morphologisch sowie stoffanalytisch untersucht. Im Folgenden eine Aufstellung der wichtigsten Ergebnisse.

Fotografie

Durch fotografische Dokumentation wird die flächige Verteilung sichtbarer, oberflächlicher Rückstände auf beiden Seiten der geprüften Verdampfer erfasst. In Abbildung 18 sind die Flammenseite und die Rückseite von Standard-Metallfaservliesen nach Versuchen mit typischen Brennstoffen dargestellt.

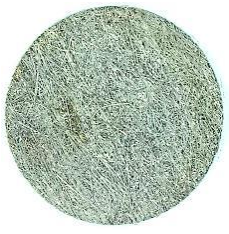
	Benzin E0	Diesel B0	Biodiesel B100 (RME)	H100
Flammenseite				
Rückseite				

Abbildung 18: Fotografische Dokumentation ausgewählter Verdampferproben

Oberflächlich und makroskopisch sind Brennstoffrückstände als dunkle Bereiche auf der sonst silbrig-glänzenden Metallfaseroberfläche erkennbar. Auf der Flammenseite ist meist ein zentraler, dunkler Fleck vorhanden, der dem Mittelpunkt des auftreffenden Inertgas-Stroms entspricht. Hier kommt es zu einer direkten Rußbildungsreaktion aus dem Brennstoff durch die hohen herrschenden Temperaturen. Rückseitig ist teilweise ein ringförmiges Gebiet um den Mittelpunkt vorhanden, das die Position maximaler Ablagerungsbildung in dem zentral vom Brennstoffeintritt ausgehenden Temperaturgradienten anzeigt. Zudem treten speziell bei FAME-Brennstoffen mehrfarbige, schimmernde Bereiche auf, die durch Anlaufen der Metalloberfläche aufgrund von Oxidationsreaktionen mit dem im Brennstoff vorhandenen Sauerstoff erklärt werden können.

Auflichtmikroskopie

Mittels Auflicht-Dunkelfeldmikroskopie wird zunächst die mikroskopische Morphologie, Farbgebung und die Position von oberflächlichen Rückständen in der umgebenden Matrix des porösen Mediums untersucht. Die Vergrößerung beträgt zwischen 1,1- und 22,5-fach. Ausgewählte Ansichten in Abbildung 19 bis Abbildung 22.

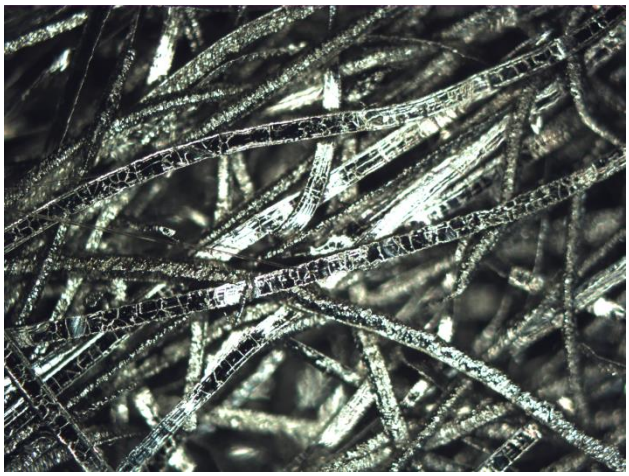


Abbildung 19: Lichtmikroskop-Aufnahme von Verdampfer-Fasern ohne Brennstoff-Ablagerungen

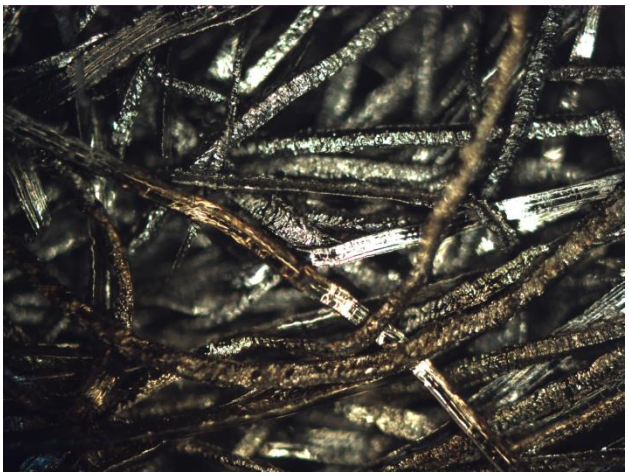


Abbildung 20: Lichtmikroskop-Aufnahme von typischen Rückständen im Verdampfer nach Prüfung mit Benzin E0

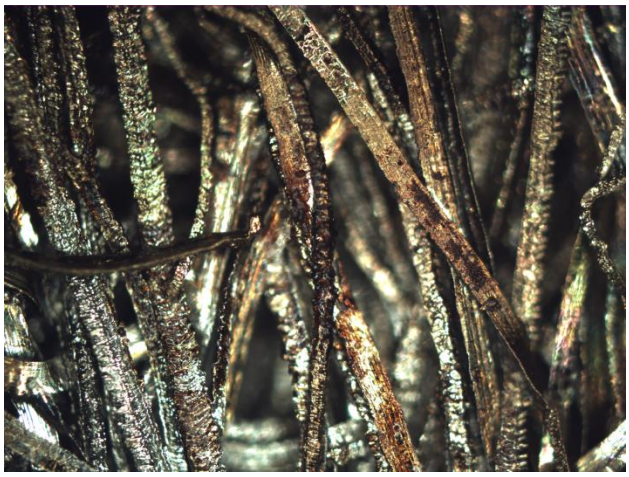


Abbildung 21: Lichtmikroskop-Aufnahme von typischen Rückständen im Verdampfer nach Prüfung mit Diesel B0

Abbildung 22: Lichtmikroskop-Aufnahme von typischen Rückständen im Verdampfer nach Prüfung mit Biodiesel B100

Rückstände von Benzin E0 erscheinen typischerweise als glatte, lackartige Schicht mit hellbräunlich-transparenter Farbe auf einer Vielzahl von Fasern. Diesel B0 erzeugt ein ähnliches Bild, allerdings mit etwas voluminöseren, dunkleren Ablagerungsschichten, deren Oberfläche deutlicher strukturiert ist. Die Bildung der Rückstände erfolgt hier vermutlich in unmittelbarer Umgebung der Faser-Oberfläche aus dem flüssigen oder zweiphasigen Brennstoff. Dagegen führt Biodiesel B100 zu klumpenartigen, dunklen Anhäufungen, die in der Regel mehrere Fasern verbinden, benachbarte Faserbereiche aber aussparen. Anzunehmen ist in diesem Fall eher eine Bildung im Brennstoff ohne Kontakt zur Faser und eine folgende Agglomeration der einzelnen Partikel.

Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) wird bei der Analyse der Verdampfer zum einen zur zuverlässigen Differenzierung von Ablagerungen und darunter liegendem Fasermaterial (Rückstreuelektronendetektor, BSD) als auch zur hoch aufgelösten Darstellung der dreidimensionalen Topografie von Rückständen (Sekundärelektronendetektor, SED) genutzt. Die Untersuchung erfolgt auf beiden Seiten von ausgewählten Verdampfern, die zum Schutz den Mikroskops zuvor mindestens 14 Tage gelagert und zudem im Vakuum getrocknet werden. In Abbildung 23 bis Abbildung 26 dargestellt ist eine Auswahl wesentlicher Befunde, die die typischen Ablagerungsbilder bei allen untersuchten Verdampfern repräsentieren.

Flammenseitig, speziell im Bereich der dunkeln Zone in der Mitte des Verdampfers, sind überwiegend fein verteilte Partikel mit einer Größe zwischen 1 und 10 µm auf den Faseroberflächen zu finden, siehe Abbildung 23. Dies spricht für eine Rußbildungsreaktion aus dem Brennstoff durch die hohen Temperaturen in der Gasphase und einen Rücktransport der Partikel auf die Verdampferoberfläche.

Auf beiden Seiten der Verdampfer sind in vielen Fällen auch flächige Rückstände erkennbar, die die Fasern teilweise oder vollständig einhüllen, siehe Abbildung 24. Hier ist die weiter oben vermutete Bildung der Ablagerungen in unmittelbarem Kontakt zur Faseroberfläche und das Aufwachsen weiterer Rückstände auf die bereits vorhanden Schicht zu erkennen. Ein ähnlicher Bildungsmechanismus ist ebenfalls bei Rückständen entsprechend Abbildung 25 gegeben, bei dem die Residuen als fein strukturierte Äste bevorzugt in den zurückversetzten Zonen der zerklüfteten Faseroberfläche auftreten. Welche Faktoren das flächig-einhüllende oder das strukturierte Ablagerungswachstum begünstigen, ist derzeit nicht mit Sicherheit zu beantworten, da beide Befunde bei verschiedenen Brennstoffen und Temperaturen auftreten.

Darüber hinaus sind häufig einzelne Partikel mit einem Durchmesser von mehreren 10 µm, unabhängig von den übrigen Ablagerungen, auf den Fasern erkennbar, als Beispiel in Abbildung 26. Hier kommt hauptsächlich die Entstehung und das Wachstum der Agglomerate aus der Flüssigphase ohne Wandkontakt und ein folgender Transport an die jeweilige Stelle in Frage. Eine gewisse Mobilität von gebildeten Feststoffen innerhalb des Verdampfers ist daher anzunehmen.

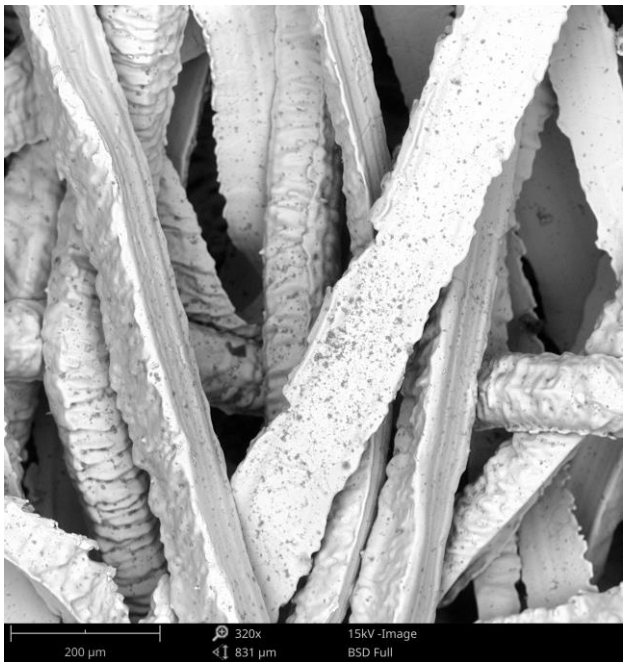


Abbildung 23: Elektronenmikroskopische Aufnahme (BSD) von Fasern (hell) auf der Flammenseite eines Verdampfers mit fein verteilten Rückstands-Partikeln (dunkel)

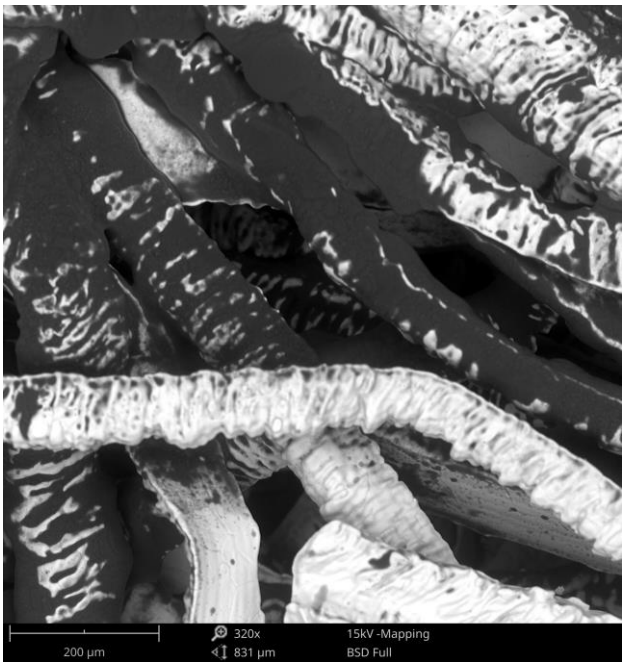


Abbildung 24: Elektronenmikroskopische Aufnahme (BSD) von Fasern (hell) auf der Flammenseite eines Verdampfers mit flächigen, teilweise einhüllenden Brennstoff-Rückständen (dunkel)

Abbildung 25: Elektronenmikroskopische Aufnahme (SED) von Fasern auf der Rückseite eines Verdampfers mit Brennstoffrückständen, die in die zerklüftete Faseroberfläche eingelagert sind

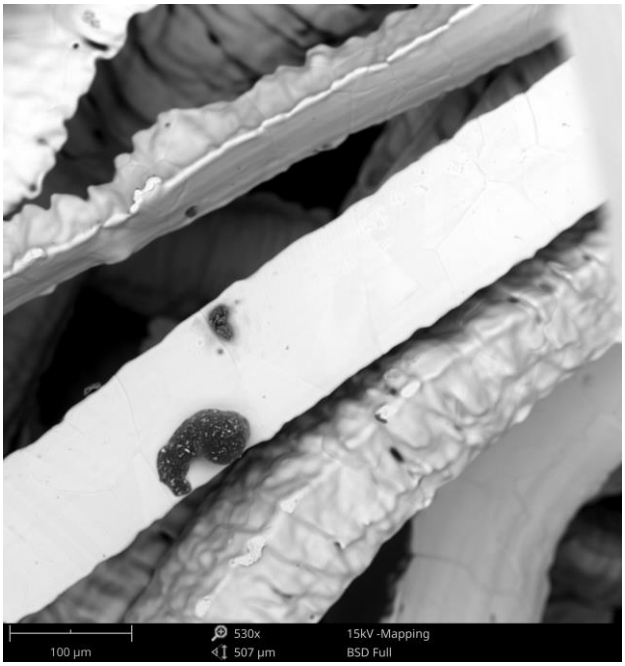


Abbildung 26: Elektronenmikroskopische Aufnahme (BSD) von Fasern (hell) auf der Rückseite eines Verdampfers mit einzelnen Rückstands-Partikeln (dunkel)

Röntgenspektroskopie

Energiedispersive Röntgenspektroskopie in Kombination mit Elektronenmikroskopie (REM-EDX) wird im vorliegenden Fall hauptsächlich zum Nachweis von anorganischen Elementen in den Rückständen, z.B. aus Brennstoffadditiven, angewendet. Als Beispiel für die durchgeführten Untersuchgen dienen Abbildung 27 und Abbildung 28.

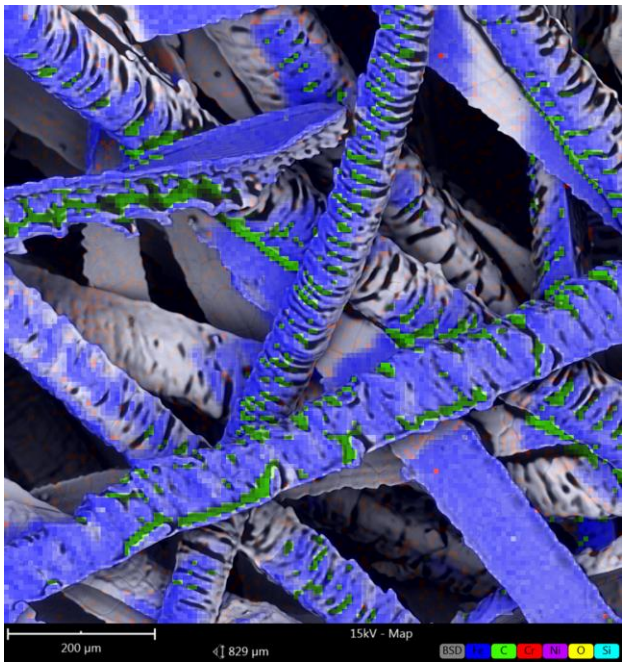


Abbildung 27: Element-Mapping mittels REM-EDX von Fasern auf der Rückseite eines Verdampfers mit Brennstoffrückständen, die in die zerklüftete Faseroberfläche eingelagert sind

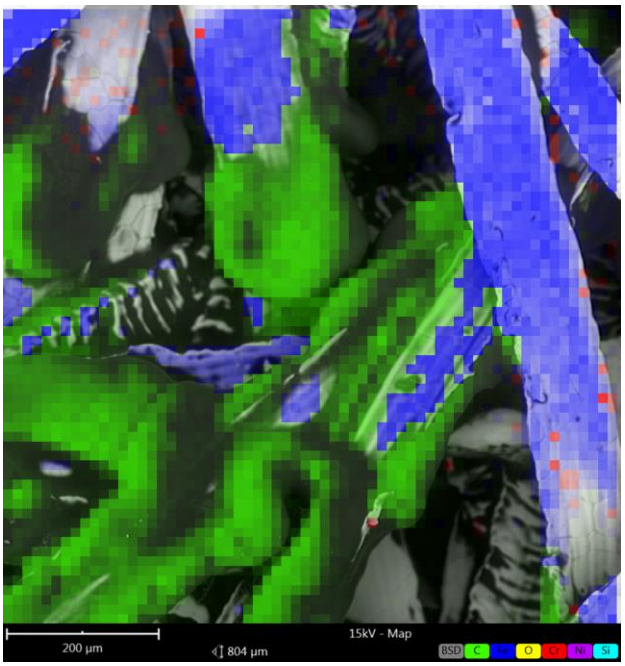


Abbildung 28: Element-Mapping mittels REM-EDX von Fasern auf der Rückseite eines Verdampfers mit flächigen, teilweise einhüllenden Brennstoff-Rückständen

Während praktisch alle aufgefundenen Ablagerungen die zu erwartenden Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff aufweisen, sind anorganische Atome, die auf den Kraftstoff oder dessen Bestandteile zurückzuführen sind, nicht nachweisbar. Ein Einsatz derartiger Additive oder anorganischer Verunreinigungen in den getesteten Kraftstoffen ist somit nicht belegbar. Insbesondere sind keine nennenswerten Gehalte an Alkali- oder Erdalkalimetallen vorhanden, die auf die Bildung von Metallcarboxylaten (Seifen) hindeuten würden [3]. Schwefel ist ebenfalls nicht nachweisbar.

Infrarot-Spektroskopie

Infrarot-Spektroskopie, in diesem Fall die Infrarot-Mikroskopie, eignet sich zur lokal aufgelösten Identifikation von molekularen Verbindungen und soll die wesentlichen Stoffgruppen auf beiden Oberflächen der untersuchten Verdampfer bestimmen. Die wichtigsten Spektren sind dargestellt in Abbildung 29 bis Abbildung 31. Die Bezeichnung „Heißgasseite“ entspricht der Flammenseite, die Bezeichnung „Brennstoffeintritt“ der Rückseite des Verdampfers.

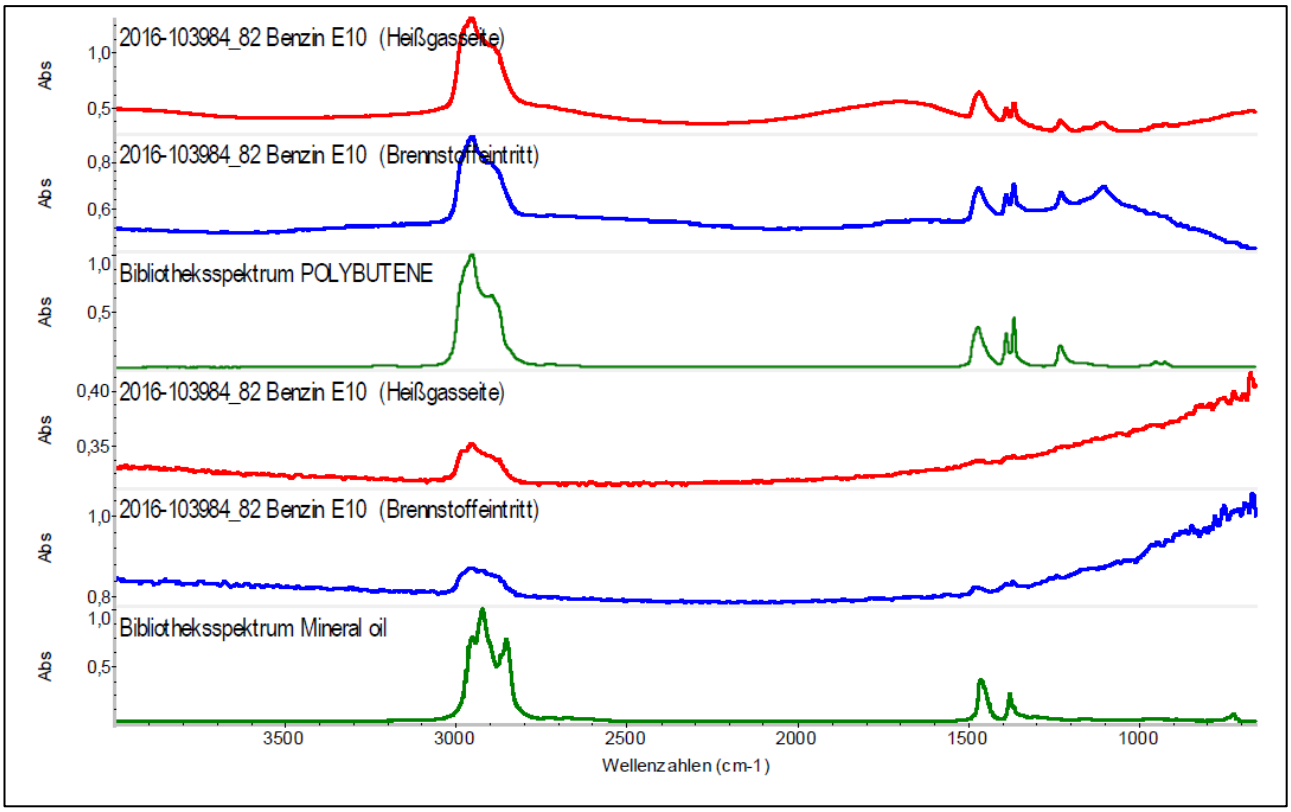


Abbildung 29: Lokale IR-Spektren an mehreren Punkten der Verdampferoberfläche eines mit Benzin E10 getesteten Verdampfers

Bei Benzin E10 ist an vielen Punkten das charakteristische Muster der C-H und C-C Bindungen von Kohlenwasserstoffen erkennbar (Abbildung 29). In den oberen beiden Spektren sind zudem Verläufe vorhanden, die Ähnlichkeit mit dem Bibliotheks-Spektrum von Polybuten aufweisen. Der zusätzlich vorhandene Peak bei etwa 1200 cm^{-1} spricht für eine C-O Bindung, die möglicherweise auf das Vorhandensein von Polyisobutylen-Succinimid (PIBSI) hinweist, welches u.a. als detergierendes Kraftstoffadditiv eingesetzt wird und bereits als möglicher Einflussfaktor auf die Ablagerungsbildung identifiziert wurde [3]. Ethanol ist wegen des Fehlens des charakteristischen O-H-Signals nicht nachweisbar.

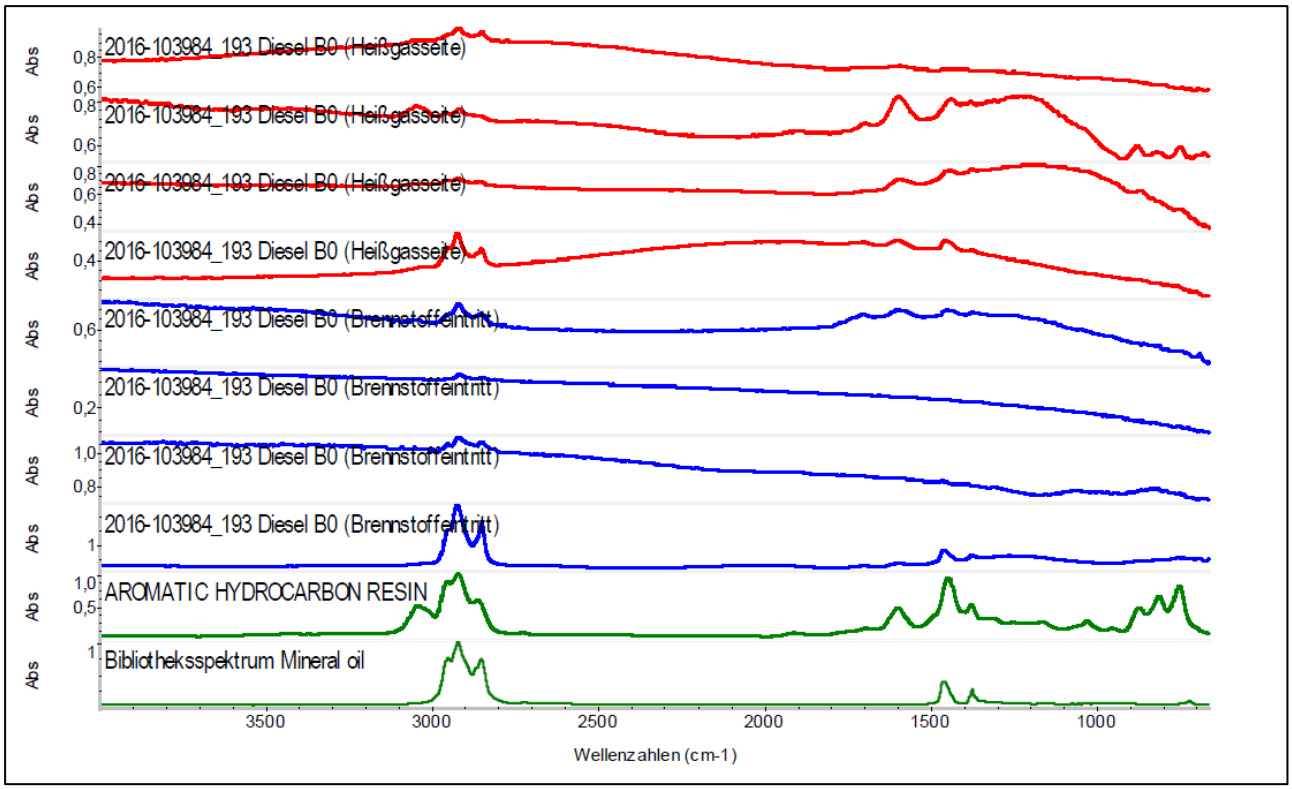


Abbildung 30: Lokale IR-Spektren an mehreren Punkten der Verdampferoberfläche eines mit Diesel B0 getesteten Verdampfers

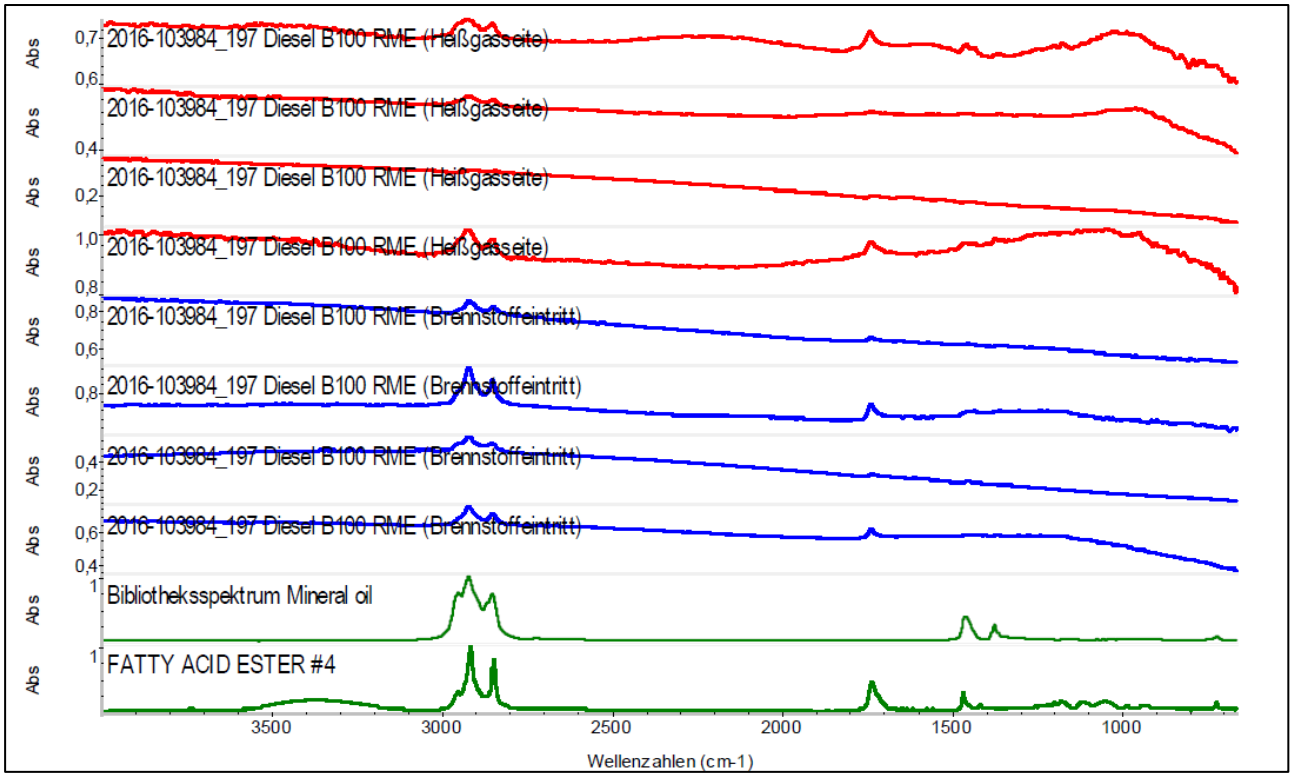


Abbildung 31: Lokale IR-Spektren an mehreren Punkten der Verdampferoberfläche eines mit Biodiesel B100 (RME) getesteten Verdampfers

Neben den typischen C-H und C-C Bindungen des Basiskraftstoffs sind bei Diesel B0 an einzelnen Positionen der Flammenseite weitere Peaks um 1500 cm^{-1} vorhanden, die auf eine Nitrogruppe (N-O) oder Amine (N-H) hinweisen könnten (Abbildung 30). Die Intensität der Signale reicht für eine zuverlässige Beschreibung nicht aus. Erwartungsgemäß sind Fettsäuremethylester, die charakteristische Carbonylschwingungen um 1750 cm^{-1} hervorrufen würden, nicht belegbar.

Biodiesel B100 (RME) hinterlässt auf dem Verdampfer im IR-Spektrum typische Muster von Fettsäuremethylestern (Abbildung 31). Für eine detailliertere Beschreibung sind auch hier die Signale zu schwach ausgeprägt.

Raman-Spektroskopie

Raman-Spektroskopie wird im vorliegenden Fall als lokal aufgelöste Methode, zunächst zum Nachweis der Bildung von Rußanteilen und im Weiteren der Bestimmung der strukturellen Ordnung der Rußanteile in den Ablagerungen angewendet. Die Analyse erfolgt oberflächlich auf beiden Seiten ausgewählter Verdampfer. Alle Ergebnisse sind dargestellt in Abbildung 32, die Bezeichnung „Heißgasseite“ entspricht der Flammenseite, die Bezeichnung „Brennstoffeintritt“ der Rückseite des Verdampfers.

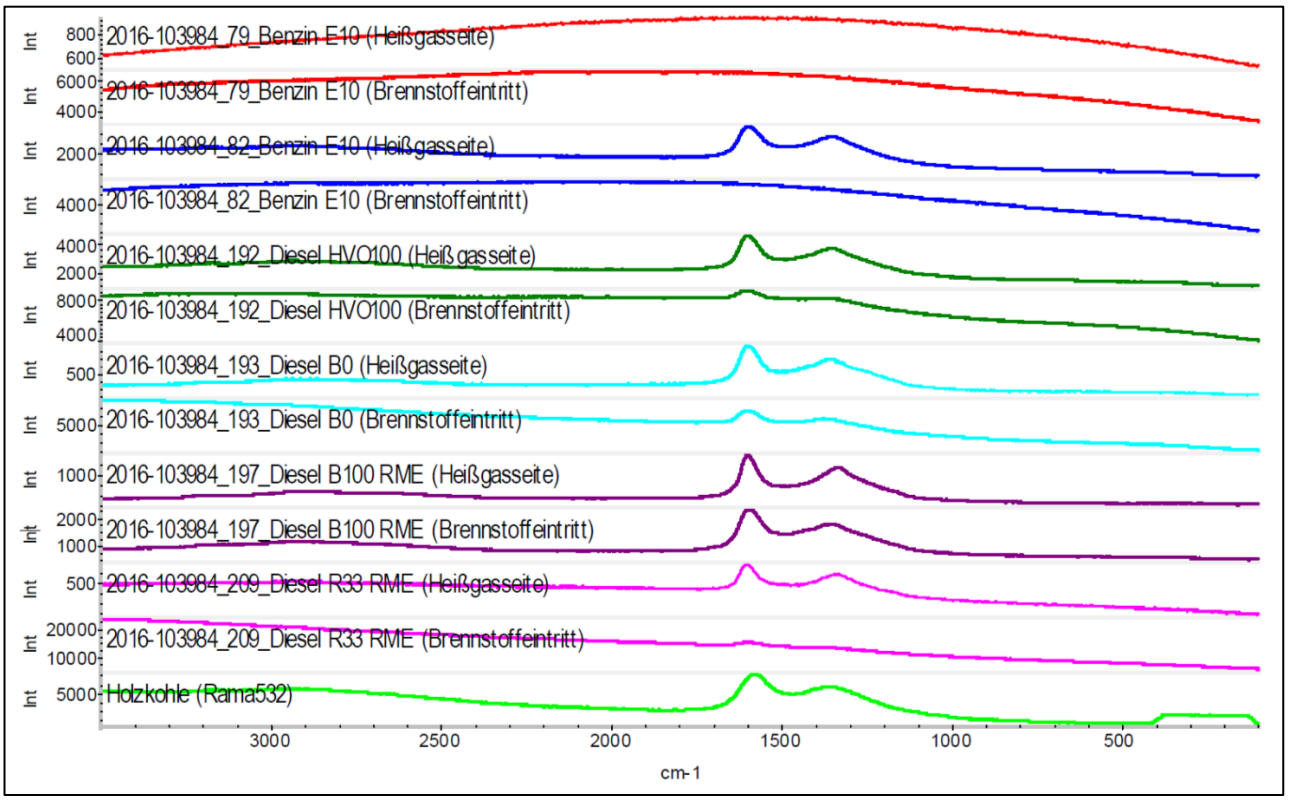


Abbildung 32: Oberflächliche Raman-Spektroskopie / -Mikroskopie ausgewählter Verdampfer mit dem Spektrum von Holzkohle als Vergleich

Der Grad der strukturellen Ordnung der Ruß-Ablagerungen wird in graphit-ähnlich (Bande bei 1590 cm^{-1}, scharf abgegrenzt, sp^2-Konfiguration des Kohlenstoffs) und diamant-ähnlich (Bande bei 1300 cm^{-1}, scharf abgegrenzt, sp^3-Konfiguration des Kohlenstoffs) unterteilt. Die Ordnung der graphit-ähnlichen Rückstände kann durch Identifikation von Defekt-Banden (bei 1330 cm^{-1}, breit) weiter abgestuft werden.

Lediglich bei Probe 79 (Benzin E10) ist kein Kohlenstoff nachweisbar, was auf die in diesem Fall niedrigen Temperaturen im Versuch (FS 400 °C / RS 100 °C) zurückzuführen ist, die für eine vollständige Dehydrierung der Kohlenwasserstoffe bzw. eine Rußbildungsreaktion nicht ausreichend sind.

Bei allen anderen Mustern ist zumindest auf der Flammenseite Kohlenstoff in graphit-ähnlicher Struktur mit unterschiedlicher Ausprägung der Ordnung, als auch eine Tendenz zur diamant-ähnlichen Struktur vorhanden. Ob dieser Kohlenstoff durch eine Wasserstoffabspaltung aus der flüssigen Phase oder eine Rußbildungsreaktion aus der Gasphase gebildet wird, kann mit der Raman-Spektroskopie nicht geklärt werden.

Wesentlich kritischer für die potentielle Lebensdauer des Brenners sind die Kohlenstoffrückstände auf der flammenabgewandten Seite des Brennstoffeintritts, die besonders bei der B100 (RME)-Probe nachweisbar sind. An dieser Position wäre ein Abbau derartiger Ablagerungen durch thermische oder oxidative Prozesse praktisch ausgeschlossen, wodurch eine irreversible Brennerschädigung eintreten kann. Zudem ist in diesem Fall die am höchsten geordnete Struktur mit zusätzlicher Tendenz zur Diamant-Struktur erkennbar, was die Abbaubarkeit zusätzlich erschwert.

Thermogravimetrische Analyse

Die Thermogravimetrie unter Luft- und Intergasatmosphäre (TGA) soll mit Informationen zu den Siede- oder Zersetzungspunkten zurückgebliebener Verbindungen eine Identifikation dieser Stoffgruppen im gesamten Verdampfervolumen ermöglichen und zudem Aussagen über eine mögliche Regeneration des Verdampfers während des Betriebs der Heizung zulassen. Geprüft wird das poröse Medium zusammen mit den enthaltenen Rückständen, ein vorheriges Herauslösen ist somit nicht erforderlich. Aufgrund des begrenzten Probenraums im Messsystem werden die Verdampfer zerschnitten und die Teile einzeln gemessen. Die Messung erfolgt im offenen Tiegel, jeweils ohne Gaswechsel und mit einer Aufheizrate von 20 K/min im Temperaturbereich von 30 bis 960 °C. Besonders aussagekräftige Befunde folgen in Abbildung 33 bis Abbildung 35.

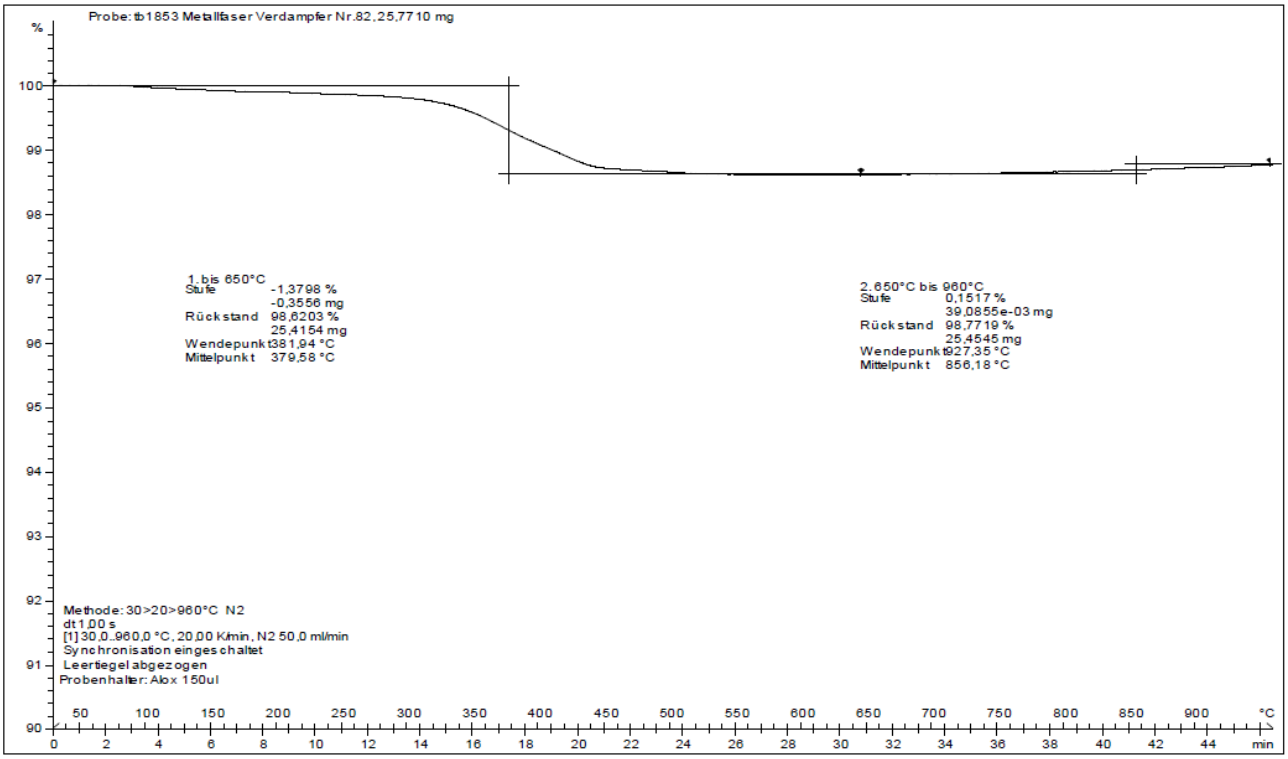


Abbildung 33: Thermogravimetrische Analyse unter Stickstoff-Atmosphäre eines mit Benzin E10 getesteten Verdampfers

Beim mit Benzin E10 getesteten Vlies ist unter Stickstoff-Atmosphäre eine Massenabnahme beginnend bei unter 100 bis etwa 450 °C festzustellen. Der stärkste Gradient liegt zwischen etwa 350 und 400 °C (Abbildung 33). Das Bild unter Luft-Atmosphäre ist ähnlich, daher sind in beiden Fällen primär

Verdampfungs- und Zersetzungsreaktionen gegeben. Hier wird ein weiteres Mal deutlich, dass die Rückstände von Ottokraftstoff keine zurückgebliebenen Kohlenwasserstoffe aus dem typischen Siedeverlauf von Motoren-Benzin sein können. Hier ergibt sich ein Unterschied zwischen den im Verdampfer vorgefundenen Ablagerungen und den aus anderen Untersuchungen bekannten Rückständen von Benzin-Ethanol-Blends, die durch eine Destillation erzeugt wurden, bei denen eine Verdampfung bzw. Zersetzung unterhalb von 180 °C auftritt [24].

Eine Regeneration des Verdampfers mit einer Verringerung der Ablagerungsmasse wäre demnach auch unter Luftausschluss möglich. Die notwendigen Temperaturen von über 400 °C werden in diesem Bereich des Brenners in der Praxis allerdings nur bestimmten Betriebspunkten erreicht.

Der Massenanstieg bei etwa 850 °C ist bei allen untersuchten Proben sowohl unter Luft- als auch unter Stickstoffatmosphäre vorhanden, auch bei einem Referenzmuster, das nicht mit Brennstoff geprüft wurde. Hier kommt es vermutlich zu einer Oxidation des Fasermaterials, im Fall der Stickstoffatmosphäre wohl durch im porösen Medium verbliebenen Rest-Sauerstoff.

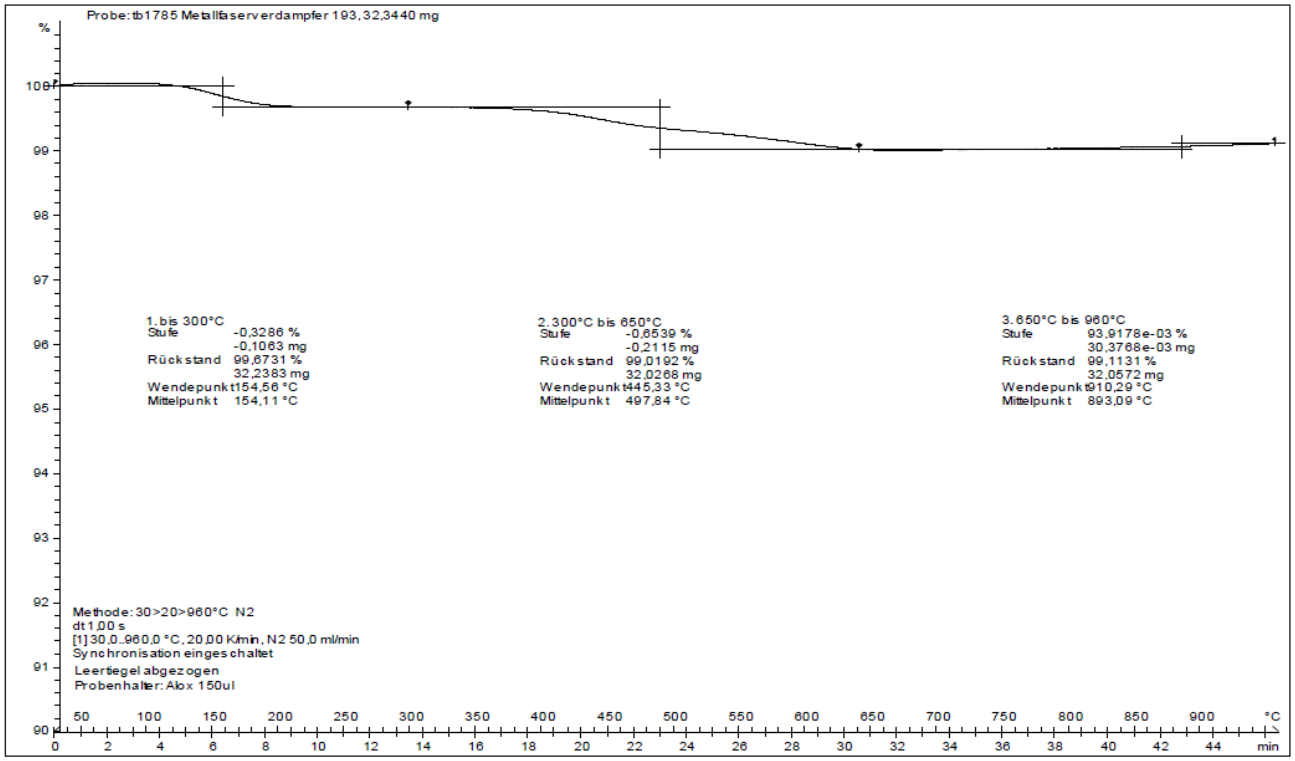


Abbildung 34: Thermogravimetrische Analyse unter Stickstoff-Atmosphäre eines mit Biesel B0 getesteten Verdampfers

Bei steigender Temperatur verringern sich die Rückstände von Diesel B0 in oxidierender sowie inerter Umgebung in zwei deutlich abgegrenzten Stufen bei etwa 150 °C und etwa 500 °C, als Beispiel dient Abbildung 34. Während der erste Abfall auf das Verdampfen oder Zersetzen von Brennstoffresten zurückgeführt werden kann, sind für die Wirkung um 500 °C höhermolekulare Verbindungen notwendig, die nicht im Siedeschnitt von typischem Dieselkraftstoff vorkommen. Da der zweite Massenverlust über einen vergleichsweise weiten Temperaturbereich verläuft, sind mehrere Spezies an diesem Effekt beteiligt. Hier ist die Pyrolyse von Ruß und Kohlenwasserstoffen der am ehesten in Frage kommende Mechanismus. Unter Annahme von im porösen Medium eingeschlossenen Luftsauerstoff ist bei diesen Temperaturen auch eine Oxidationsreaktion von Kohlenstoff und ein Entweichen des gebildeten Kohlenstoffmonoxids bzw. -dioxids möglich.

Bei der gewählten Aufheizrate sind bis etwa 630°C Massenverluste nachweisbar, eine oxidierende Atmosphäre verändert diese Temperatur nicht wesentlich. Ein nachträglicher thermischer Abbau derartiger Ablagerungen durch Diesel B0 im Verdampfer während des Brenner-Betriebs ist damit bei heute typischen

Brennern ausgeschlossen. Die Bildung derartiger Rückstände speziell in flammenfernen Bereichen des Vlieses führt zu einer irreversiblen Schädigung des Bauteils.

Rückstände von Biodiesel B100 (RME) führen in der TGA zu ähnlichen, zweistufigen Masseverlusten wie die von Diesel B0, siehe Abbildung 35. Da für den ersten Massenverlust in diesem Fall Brennstoffrückstände nicht in Frage kommen, muss es hier entweder zu einer Siedereaktion von Carbonsäuren, Aldehyden oder Ketonen als Abbauprodukte von Fettsäuremethylestern oder zu einer teilweisen Zersetzung von oxidierten FAME kommen.

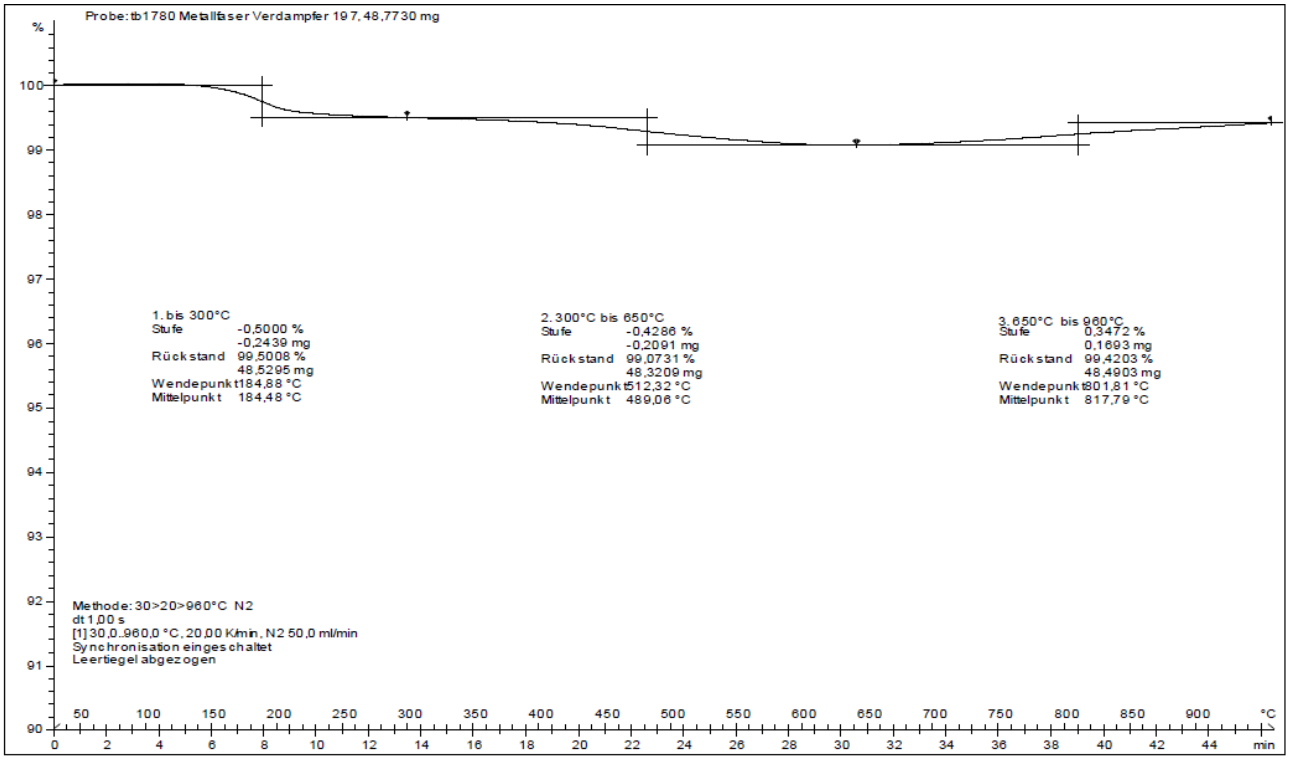


Abbildung 35: Thermogravimetrische Analyse unter Stickstoff-Atmosphäre eines mit Biodiesel B100 (RME) getesteten Verdampfers

Gaschromatographie

Für ausgewählte Verdampfer wird zur hochaufgelösten Identifikation einzelner Molekülspezies eine zweidimensionale Gaschromatographie mit gekoppelter Flugzeit-Massenspektrometrie (GCxGC-TOFMS) eingesetzt, siehe auch [4]. Die Rückstände werden zur Vorbereitung der Analyse in einem Ultraschallbad mit Kohlenstoffdisulfid (CS_2) aus dem porösen Medium extrahiert.

Als Beispiel im Folgenden ein 2D-Chromatogramm mit den identifizierten Substanzklassen nach der Datenauswertung (Abbildung 36). Jedes farbige Quadrat repräsentiert eine detektierte Verbindung mit einem Signal-zu-Rausch Verhältnis von größer 100. Anschließend ausgewählte Ergebnisse analysierter Verdampfer mit der Darstellung der gefundenen Substanzen nach Flächenprozent (Abbildung 37 bis Abbildung 39).

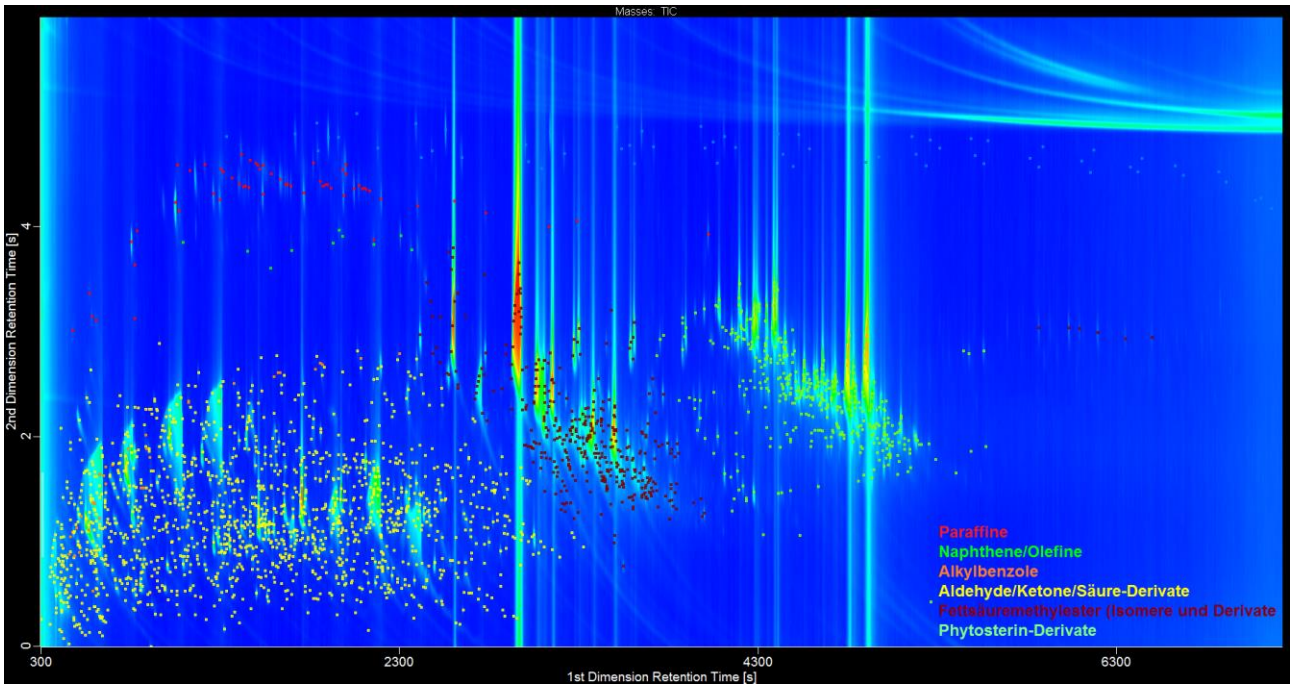


Abbildung 36: 2D-Chromatogramm mit identifizierten Substanzklassen der Rückstände aus einem mit Diesel B0 geprüften Verdampfer als Beispiel

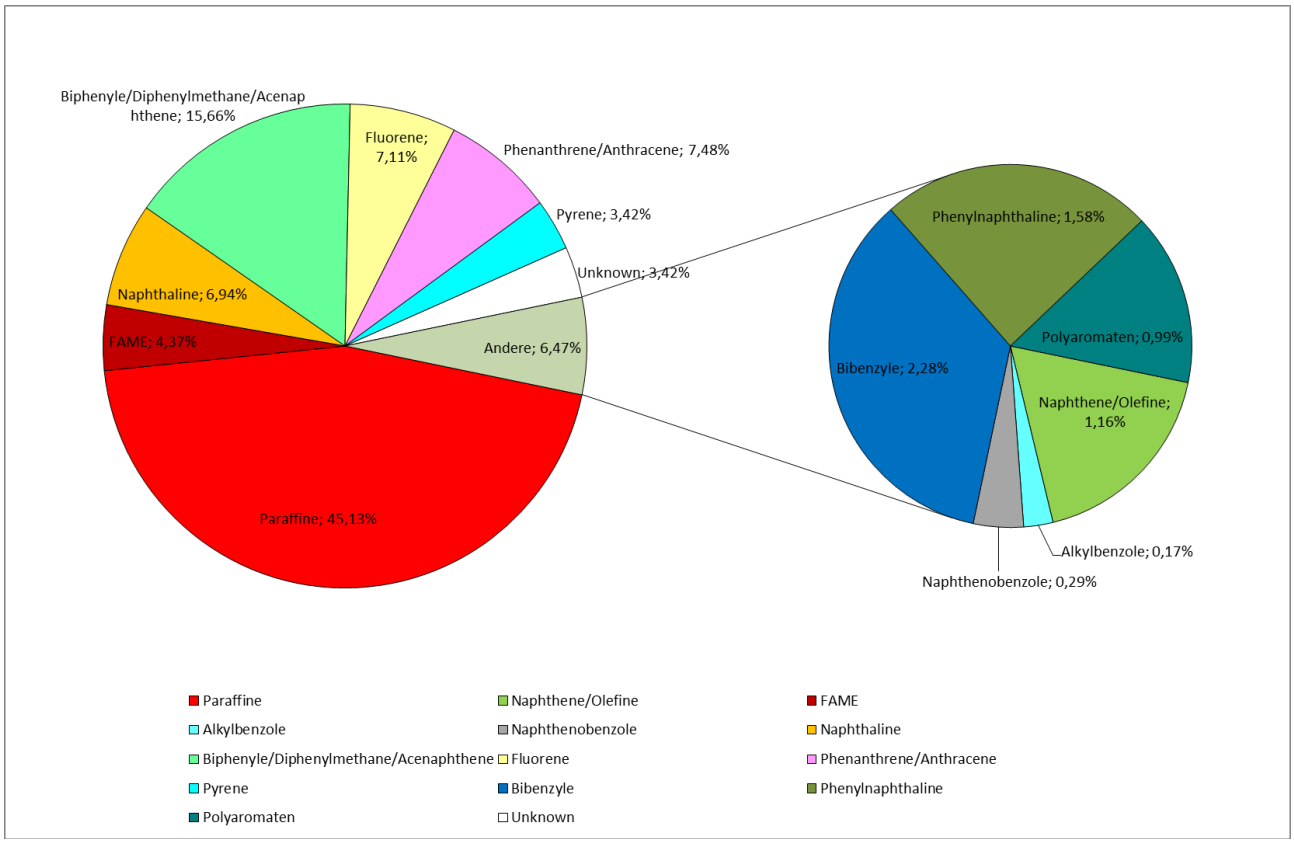


Abbildung 37: Prozentuale Verteilung der Substanzklassen (Flächenprozent) in den Rückständen aus einem mit Benzin E0 geprüften Verdampfer

Bei den Rückständen aus Ottokraftstoff sind etwa 45 % Paraffine und etwa 46 % Aromaten nachweisbar, siehe Abbildung 37. Dies belegt eine gewisse Aufkonzentrierung von aromatischen Verbindungen durch die Siedevorgänge im Verdampfer, da im Ausgangskraftstoff ein Aromatengehalt von etwa 33 vol% bestimmt wird. Olefine sind in der Gaschromatografie nur in geringem Maße aufzufinden, obwohl im eingesetzten Benzin E0 etwa 9 vol% enthalten sind. Dies spricht für einen fast vollständigen Abbau von Verbindungen mit Kohlenstoff-Doppelbindungen, ausgenommen Aromaten. Das gefundene Anthracen, Phenanthren und Pyren ist in dieser Menge im Basiskraftstoff aufgrund der Siedepunkte praktisch auszuschließen und muss demnach durch oxidative Prozesse, vermutlich während der Verdampfung, entstanden sein. Fettsäuremethylester gehören nicht zu den beabsichtigten Komponenten von Motorenbenzin, sind aber mittlerweile durch Vermischungen beim Handling von Kraftstoffen in typischer Tankstellenware zu finden. Die vergleichsweise hohe nachgewiesene Menge in diesem Fall deutet allerdings auf eine Aufkonzentrierung im Verdampfer hin. Ein Zurückbleiben von FAME-Resten im Versuchsaufbau von vorangegangenen Versuchen oder eine Verunreinigung der Proben nach dem Versuch ist auszuschließen.

Die im Versuch gezeigte Ablagerungsbildung bei Benzin E0 ist demnach auf eine temperaturinduzierte Aufkonzentrierung schwersiedender Komponenten mit beginnendem oxidativem Angriff zurückzuführen.

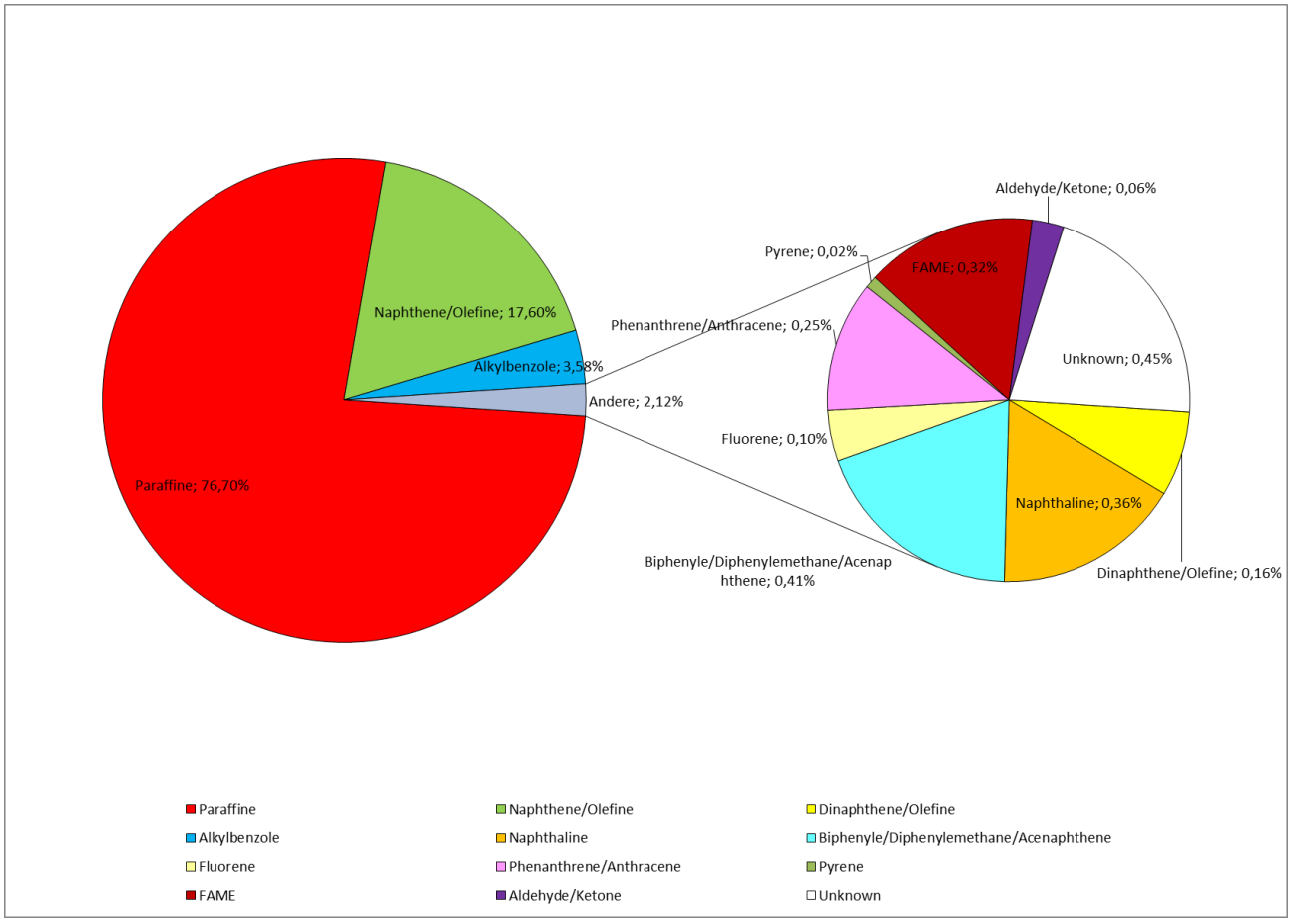


Abbildung 38: Prozentuale Verteilung der Substanzklassen (Flächenprozent) in den Rückständen aus einem mit Diesel B0 geprüften Verdampfer

Die Rückstände von Diesel B0 ähneln der Zusammensetzung des Ausgangs-Kraftstoffs, wobei speziell bei den Paraffinen eine destillative Selektierung der verschiedenen Alkane mit Bevorzugung höhersiedender Spezies anzunehmen ist (Abbildung 38). Potentielle Abbauprodukte aus der Alterung bzw. thermischen Schädigung des Diesels, insbesondere Aldehyde und Ketone, sind in verhältnismäßig geringer Menge nachweisbar. Die Rückstandbildung erfolgt hier überwiegend durch Zurückbleiben bzw. Selektion von Alkanen, Zykloalkanen und Olefinen. Die nachgewiesenen Fettsäuremethylester sind wieder auf Verunreinigungen des eingesetzten Kraftstoffs zurückzuführen.

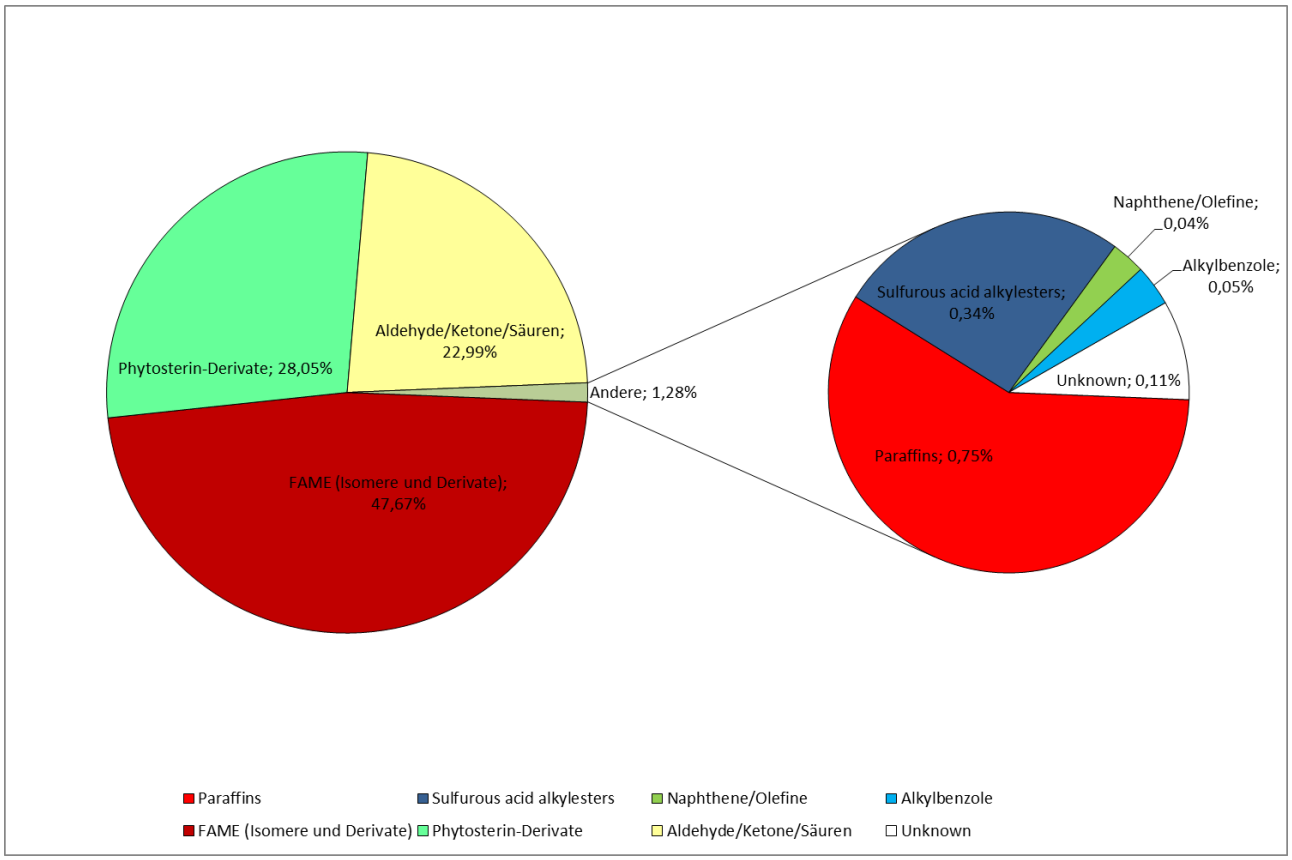


Abbildung 39: Prozentuale Verteilung der Substanzklassen (Flächenprozent) in den Rückständen aus einem mit Biodiesel B100 (RME) geprüften Verdampfer

Mit RME geprüfte Verdampfer zeigen einen unerwartet hohen Gehalt an Nicht-Fettsäuremethylester-Komponenten (Abbildung 39). Die Aldehyde, Ketone und Säuren sind eindeutig als Abbauprodukte des Kraftstoffs einzuordnen und stellen einen erheblichen Teil der Rückstandsmenge dar. Aufgrund ihrer Siedepunkte sind sie allerdings weniger als irreversible Rückstände im Verdampfer anzusehen. Anders die ebenfalls prominent vertretenen Phytosterine, deren Eigenschaften ein permanentes Zurückbleiben im Verdampfer begünstigen. In der Literatur wurde bislang kein Zusammenhang zwischen dem Gehalt an derartigen Pflanzenstoffen, insbesondere den Sterylglycosiden, und der Neigung des Kraftstoffs zur Ablagerungsbildung oder dem Zusetzen von Kraftstofffiltern gefunden [25]. Der hohe Anteil der hier im Verdampfer gefundenen Phytosterin-Derivate macht einen nennenswerten Einfluss bei der Ablagerungsbildung in Standheizungs-Brenner allerdings wahrscheinlich.

Die festgestellten Paraffine sind nicht als Verunreinigung anzusehen, da ein gewisser Anteil an Alkanen in FAME-Kraftstoffen zu erwarten ist. Die Ester der Schwefelsäure könnten ihren Ursprung in Additiven haben, z.B. Tensiden oder Bioziden.

2.2 Arbeitspaket: Ablagerungs- und Sedimentbildung von Benzin-Blends

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein Prüfstand zur Untersuchung möglicher Ablagerungsbildung bei der Verdampfung von Benzinkraftstoffen aufgebaut und betrieben. Alle für die Untersuchungen von Ablagerungscharakteristiken relevanten Bereiche (Beheizung des Tiegels, Brennstoffzuführung) sind identisch zu dem Tiegelprüfstand für Dieselkraftstoffe geplant und aufgebaut worden. Die Prüfstandsbeschreibung sowie Angaben zur Versuchsdurchführung sind dem Kapitel 2.3 zu entnehmen. Modifikationen waren im Bereich Kraftstoffvorhaltung und Eigensicherheit notwendig.

Vorversuche wurden auf dem existierenden System durchgeführt, für das u.a. eine dezidierte Steuerung vorhanden ist. Anschließend wurden die Ergebnisse der Vorversuche mit Ergebnissen des explizit für Ottokraftstoffe ausgelegten Systems verglichen. Die weiteren Untersuchungen zur Ablagerungsbildung von Ottokraftstoffblends wurden dann an dem neu aufgebauten Verdampfungsprüfstand durchgeführt.

Als Referenzkraftstoff wurde ein Benzin nach DIN EN 228 ohne Ethanolanteil verwendet („E0 OK“). Der Temperaturbereich für die Ablagerungsversuche mit Benzin wurde in Absprache mit dem Verbundpartner auf 200 °C bis 400 °C festgelegt. Wünschenswert wären sowohl niedrigere, als auch höhere Temperaturen, welche jedoch mit dem System nicht unter Einsatz von Benzinkraftstoffen realisiert werden können. In Tabelle 4 sind die getesteten Blends sowie die Versuchstemperaturen aufgeführt.

Tabelle 4: Kraftstoffmatrix Tiegelverdampfungsprüfstand (Benzin)

	Nr.	Bez.							
Benzin-Tiegel	1	E0 OK	Benzin	100%					
	2	E5 OK EtOH	Benzin	95%		Ethanol		5%	
	3	E10 OK EtOH	Benzin	90%		Ethanol		10%	
	4	E25 OK EtOH	Benzin	75%		Ethanol		25%	
	5	E50 OK EtOH	Benzin	50%		Ethanol		50%	
	6	E85 OK EtOH	Benzin	15%		Ethanol		85%	
	7	E100 EtOH	Ethanol	100%					
	8	M25 OK MetOH	Benzin	75%		Methanol		25%	
	9	M50 OK MetOH	Benzin	50%		Methanol		50%	
	10	B25 OK ButOH	Benzin	75%		1-Butanol		25%	
	11	B50 OK ButOH	Benzin	50%		1-Butanol		50%	
	Versuchstemperaturen in °C:			200	250	300	350	400	

Als Blendkomponenten zu Benzin wurden verschiedene einwertige Alkohole ausgewählt, welche in internationalen Kraftstoffmärkten vertreten sind. Es wird erwartet, dass höhere Zumischraten an Alkoholen die Neigung zur Ablagerungsbildung verringern. In Abbildung 40 sind die Ergebnisse der Ablagerungsversuche (Ottokraftstoffblends) dargestellt.

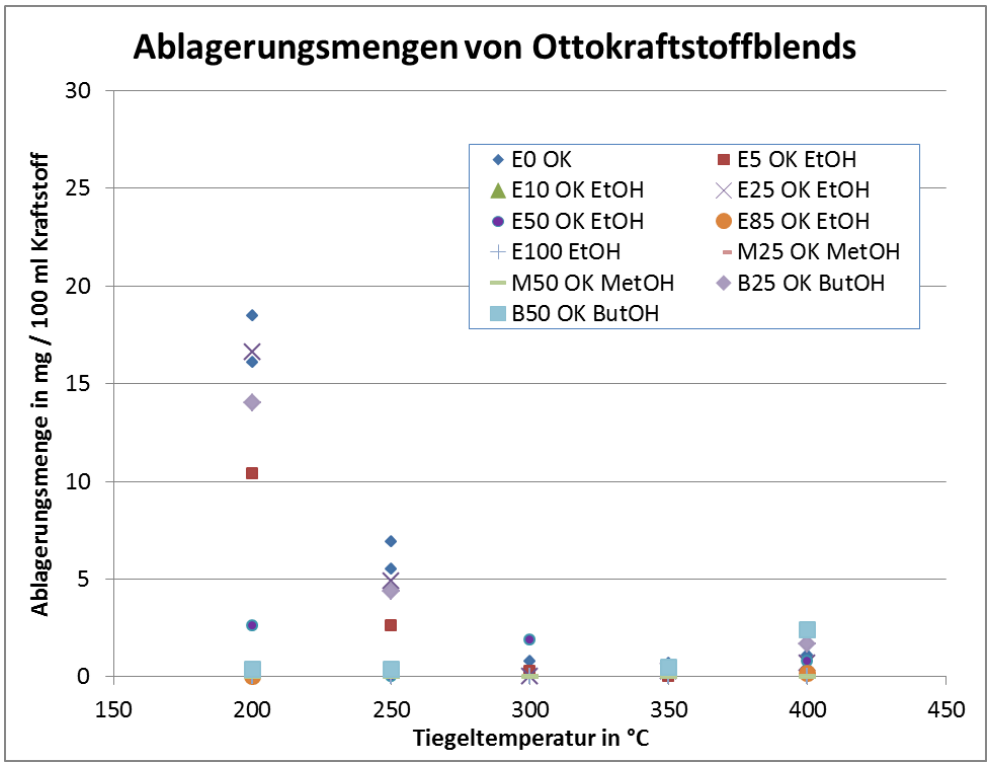


Abbildung 40: Ergebnisse des Tiegelverdampfungsprüfstand für Benzin bzw. Ottokraftstoffblends

Zunächst wurden zur Überprüfung der Vergleichbarkeit bzw. Wiederholbarkeit einige Wiederholungsversuche mit E0 (Benzin) durchgeführt. Diese sind in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt. Hierbei konnte die gute Wiederholbarkeit des Versuchs gezeigt werden. Sowohl die gemessenen Ablagerungsmengen, als auch das optische Erscheinungsbild der Tiegel nach Versuchsende waren vergleichbar und entsprachen den Erwartungen. Die Taktzeit wurde anhand der Vorversuche auf 15 Sekunden eingestellt.

Wie erwartet steigen die Ablagerungsmengen mit sinkender Tiegeltemperatur. Im Temperaturbereich ab 400 °C sind die Ablagerungsmengen nicht mehr zweifelsfrei zu bestimmen. Bei dieser hohen Temperatur treten zudem Oxidationsreaktionen des Tiegelmaterials auf, die zu einer geringen Massezunahme führen können. Diese liegt im relevanten Temperaturbereich unter 1 mg. Dieser Effekt beeinflusst zusätzlich die gravimetrische Bestimmung von Ablagerungen. Beschrieben wurde dieser Effekt bereits in [26]. Bei Temperaturen unter 350 °C ist dieser Effekt dagegen zu vernachlässigen.

Unterhalb von 250 °C steigen die Ablagerungsmengen signifikant an. Dieses kann anhand der fotografischen Dokumentation der Tiegel nach Versuchsende nachvollzogen werden (siehe Abbildung 41 bis Abbildung 52). Insbesondere bei Temperaturen um 200 °C verändert sich zudem die Morphologie der gebildeten Ablagerungen. Während die Ablagerungen bei höheren Temperaturen trocken und pulver-/koksartig sind (Verkokung/Cracking des aufgebrachten Kraftstoffs) sind die Ablagerungen von Versuchen bei 200 °C als klebrig zu bezeichnen (engl: „sticky“, „gum formation“).

E0				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 41: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin E0

E0				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 42: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin E0 (Wiederholungsversuche)

E5				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 43: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin E5

E10				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 44: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin E10

E25				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 45: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin E25

E50				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 46: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin E50

E85				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 47: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin E85

E100				
	X	X	X	X
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 48: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Ethanol E100*

*: Es wurde auf Versuche bei Tiegeltemperaturen größer 200 °C verzichtet, da nach Bewertung des Versuchs bei 200 °C mit reinem Ethanol keine messbaren Ablagerungsmengen erwartet wurden.

B25				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 49: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin B25

B50				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 50: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin B50

M25				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 51: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin M25

M50				
200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C

Abbildung 52: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Benzin M50

Insgesamt betrachtet sind die gebildeten Ablagerungsmengen als gering zu bewerten. Bei der niedrigsten Testtemperatur von 200 °C lagen die höchsten Ablagerungsmengen (Benzin, E0) bei lediglich ca. 20 mg/100ml Kraftstoff. Auch bei 250 °C Tiegeltemperatur zeigte reines Benzin (E0) die höchsten Ablagerungsmengen auf insgesamt sehr niedrigem Niveau (ca. 6 mg/100ml Kraftstoff).

Ab einer Testtemperatur von 300 °C sind die Ablagerungsmengen nicht mehr präzise bestimmbar (< 5 mg) und somit die Neigung zur Ablagerungsbildung der einzelnen Kraftstoffe nicht mehr differenzierbar. Generell ergibt sich eine gute Korrelation zu den Versuchen am Verdampfervlies aus TV1 (siehe Abbildung 14).

Es ist anzumerken, dass sich bei Tiegeltemperaturen von 250 °C und 300 °C die Morphologie der gebildeten Ablagerungen von E50 optisch von den Ablagerungen von E25 und E85 unterscheiden. Die Ablagerungen der Kraftstoffmischung E50 zeigen Hinweise auf verstärkte Verkokungsneigung dieser Brennstoffmischung. Ähnliche Hinweise sind bei den Mischungen B25 und M25 bei einer Temperatur von 200 °C sichtbar.

Hinsichtlich der gebildeten Ablagerungsmengen können auf Basis der vorliegenden Ergebnisse der idealisierten Tiegelverdampfers Betriebstemperaturen größer 250 °C empfohlen werden.

2.3 Arbeitspaket: Ablagerungs- und Sedimentbildung von Diesel-Blends

Prüfstandsaufbau

Der in diesem AP verwendete Prüfstand wurde in dem von der FNR geförderten GObio Projekt aufgebaut. Bevor im Rahmen des vorliegenden Projektes Messungen durchgeführt werden konnten, mussten weitere Optimierungsschritte unternommen werden. So wurde beispielsweise die Verbrennung der entstehenden Kraftstoffdämpfe räumlich vom Ort der Verdampfung (Tiegel) getrennt. Die Beseitigung der Dämpfe erfolgt nun mit einem Erdgas-Abflammer, der am Ende einer Gas-Dampf-Sammelleitung angebracht ist. Die räumliche Trennung hat den Vorteil, dass die Betriebsweise des Abflammers keine direkten oder indirekten Auswirkungen auf die Verdampfung des Kraftstoffs auf der Tiegeloberfläche und somit auf die Ablagerungsbildung hat. Der Prüfstandsaufbau ist der Abbildung 53 zu entnehmen.

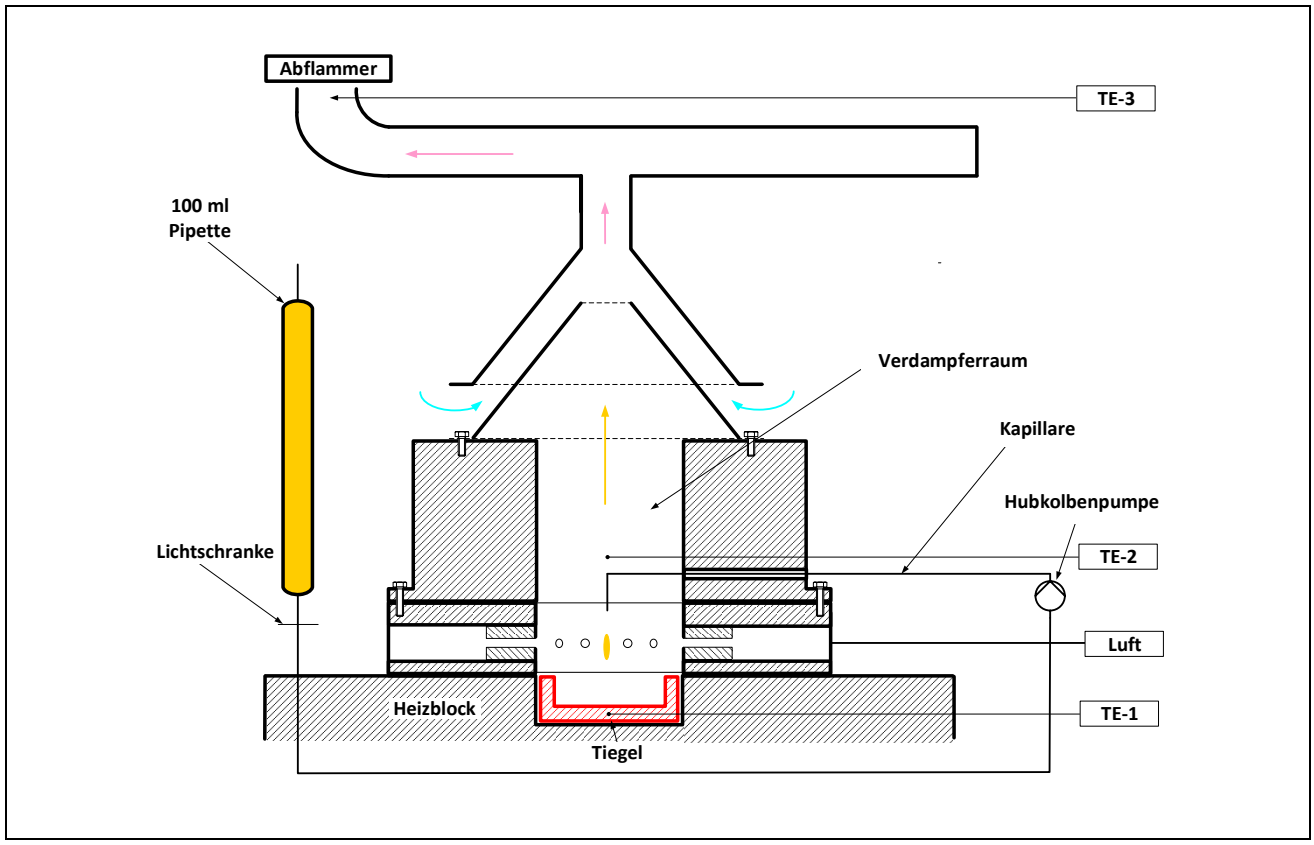


Abbildung 53: Schematischer Aufbau des Tiegelverdampfungsprüfstand (Diesel)

Die Kraftstoffdosierung erfolgt mittels einer Hubkolbenpumpe, die den Kraftstoff aus einem Reservoir (Pipette, 100 ml) ansaugt und durch eine Kapillare mit 1 mm Innendurchmesser auf den beheizten Tiegel tropft. Die entstehenden Kraftstoffdämpfe werden durch einen Spülgasstrom (Luft) aus dem Verdampferraum ausgetragen und in die Sammelleitung geleitet. Durch den Abflammerbetrieb entsteht in der Sammelleitung ein leichter Unterdruck (Kaminzugeffekt). So kann sichergestellt werden, dass die entstehenden Dämpfe zum Abflammer gefördert und dort verbrannt werden. Die Bestimmung der gebildeten Ablagerungsmengen erfolgte gravimetrisch (Tiegelmasse vor und nach dem Versuch) mittels einer Analysewaage. Diese besitzt im verwendeten Gewichtsbereich eine Genauigkeit von 0,5 mg und eignet sich daher gut zur Bestimmung geringer Ablagerungsmengen. Die Vergleichbarkeit der Methode liegt bei ca. ± 2,5 mg (empirisch ermittelt).

Versuchsdurchführung

In Vorversuchen mit den im Projekt zu untersuchenden Kraftstoffblends wurde die minimale Taktzeit der Hubkolbenpumpe zur Brennstoffdosierung bestimmt, bei der die auf den Tiegel aufgebrachte

Kraftstoffmenge pro Takt sicher verdampft werden kann, bevor der darauf folgende Hub den nächsten Kraftstofftropfen aufbringt. Für die zu betrachtenden Dieselkraftstoffblends wurde auf Basis dieser Ergebnisse eine Taktzeit von 15 Sekunden abgeleitet. Daraus ergibt sich eine Versuchszeit von ca. 20 h pro Testpunkt.

Die zu untersuchenden Kraftstoffblends wurden mit dem Verbundpartner abgestimmt und können der Tabelle 5 entnommen werden. Die Analysezertifikate der Kraftstoffe sind dem Anhang zu entnehmen. Ebenso sind die Versuchstemperaturen angegeben. Diese sind für alle Kraftstoffe identisch.

Tabelle 5: Kraftstoffmatrix Tiegelverdampfungsprüfstand (Diesel)

	Nr.	Bez.						
DK-Tiegel	1	B0	Diesel	100%				
	2	B7 DK RME	Diesel	93%	RME	7%		
	3	B7 DK SME	Diesel	93%	SME	7%		
	4	B7 DK PME	Diesel	93%	PME	7%		
	5	B30 DK RME	Diesel	70%	RME	30%		
	6	B50 DK RME	Diesel	50%	RME	50%		
	7	B50 DK SME	Diesel	50%	SME	50%		
	8	B100 RME			RME	100%		
	9	B100 SME			SME	100%		
	10	B100 PME			PME	100%		
	11	R33 DK HVO RME	Diesel	67%	HVO	26%	RME	7%
	12	R33 DK HVO SME	Diesel	67%	HVO	26%	SME	7%
	13	H10 DK HVO	Diesel	90%	HVO	10%		
	14	H50 DK HVO	Diesel	50%	HVO	50%		
	15	H100 HVO			HVO	100%		
	16	PfÖl5 DK PfÖl	Diesel	95%	PfÖl	5%		
	Versuchstemperaturen in °C:			300	325	350	375	450

Es handelt sich bei den verwendeten Kraftstoffkomponenten um typische und im Markt vertretende Komponenten. Sie unterscheiden sich zum Teil erheblich in ihren Siedeeigenschaften (Destillationsbeginn, -ende) und weiteren Stoffdaten, wie bspw. dem Anteil an ungesättigten Verbindungen. Im Allgemeinen wird bei Beimischungen von FAME eine Verstärkung der Ablagerungsbildung erwartet, wobei der Biodiesel-Feedstock wesentlichen Einfluss auf die Menge der Rückstände aufweisen kann. Ebenso ist der Einfluss von HVO als Blendkomponente auf die Ablagerungsbildung zu klären. Zudem ist ein Stichversuch mit einer Zumischung von 5 % Pflanzenöl zu mineralölstämmigen Dieselkraftstoff vorgesehen. Reines, unverestertes Pflanzenöl unterscheidet sich hinsichtlich der Verdampfungseigenschaften nochmals deutlich von den übrigen Kraftstoffen.

Versuchsergebnisse

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse der Tiegelversuche (Dieselkraftstoffe) dargestellt. Der Kraftstoffblend PfÖl5 DK PfÖl (Zumischung von 5 vol.-% Rapsöl) wird separat betrachtet (siehe Abbildung 70).

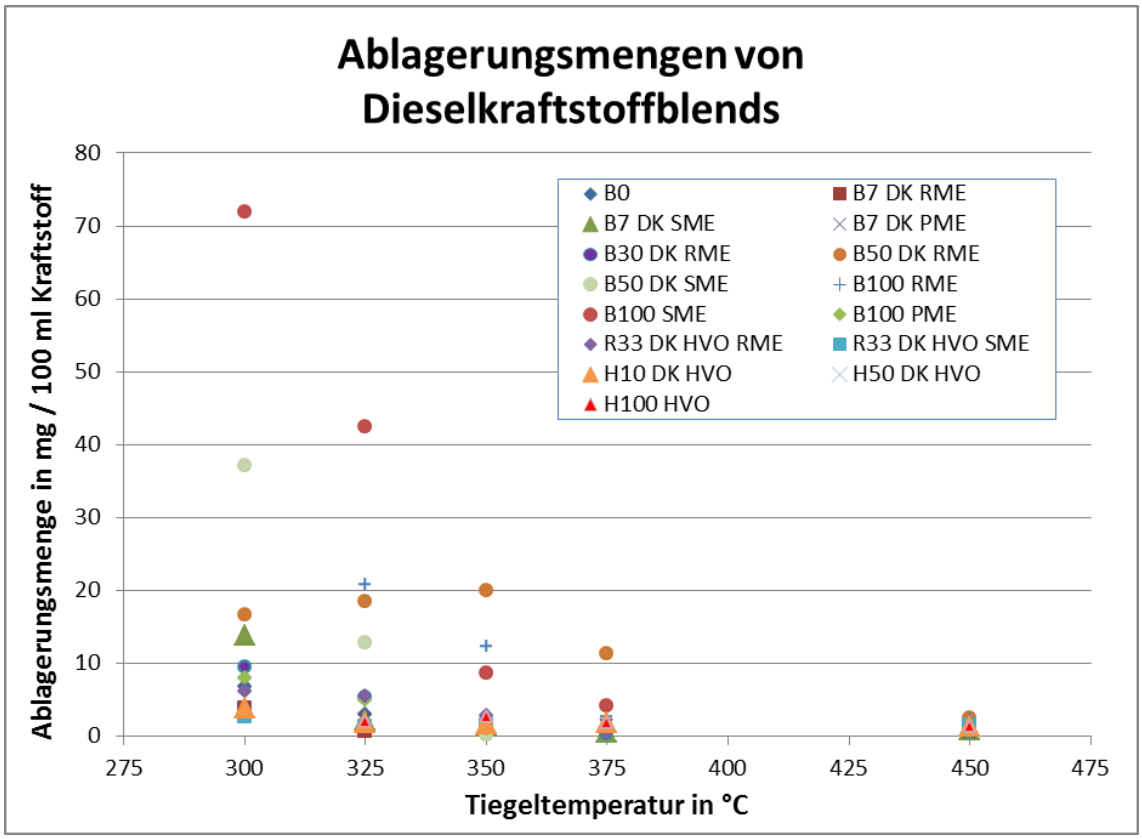


Abbildung 54: Ergebnisse des Tiegelverdampfungsprüfstand (Dieselkraftstoffe)

Wie aus früheren Untersuchungen bereits bekannt ist, treten bei niedrigeren Tiegeltemperaturen größere Ablagerungsmengen auf als bei hohen Temperaturen. Ab einer Temperatur von etwa 375 °C sind die Ablagerungsmengen zu gering, um signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Kraftstoffen feststellen zu können (Ausnahme *B50 DK RME*). Im Temperaturbereich darunter ist zu erkennen, dass FAME als Blendkomponente die Ablagerungsmenge erhöht. Insbesondere scheint SME die Ablagerungsbildung unter den vorherrschenden Bedingungen zu begünstigen.

Die Ablagerungsmengen liegen für die untersuchten Kraftstoffblends im Bereich bis ca. 72 mg/100 ml Kraftstoff (*B100 SME*). Der rein mineralölstämmige Diesel (*B0*) weist lediglich eine Ablagerungsmenge von ca. 7 mg/100 ml Kraftstoff auf. Marktgängige Blends mit 7 % FAME (B7) zeigen ebenfalls geringe Ablagerungsmengen bis 5 mg/100 ml Kraftstoff (RME und PME). Diese geringen Unterschiede zu *B0* liegen innerhalb der Vergleichbarkeit der Methode. Die Ablagerungsmenge von *B7 DK SME* liegt bei ca. 14 mg/100 ml Kraftstoff. Eine ähnliche Tendenz weisen die SME-haltigen Kraftstoffe *B50 DK SME* und *B100 SME* im direkten Vergleich zu den Kraftstoffen *B50 DK RME* und *B100 RME* auf. Die Ablagerungsmengen der SME-haltigen Kraftstoffe liegen stets über denjenigen von Kraftsoffen mit anderer FAME-Komponente.

Bei 325 °C Tiegeltemperatur weisen lediglich die Kraftstoffblends *B50 DK RME*, *B50 DK SME*, *B100 RME* sowie *B100 SME* signifikante Ablagerungsmengen auf. Alle anderen Mischungen bilden Ablagerungen < 10 mg/100 ml Kraftstoff.

Die fotografische Dokumentation der Tiegel ist den folgenden Abbildungen zu entnehmen.

B0				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 55: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B0

B7 RME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 56: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B7 RME

B7 SME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 57: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern Diesel B7 SME

B7 PME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 58: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B7 PME

B30 RME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 59: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B30 RME

B50 RME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 60: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B50 RME

B50 SME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 61: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern Diesel B50 SME

B100 RME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 62: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B100 RME

B100 SME				
				Versuch nicht durchführbar (Zündung)
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 63: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B100 SME

B100 PME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 64: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel B100 PME

R33 RME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 65: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel R33 RME

R33 SME				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 66: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel R33 SME

H10				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 67: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel H10

H50				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 68: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel H50

H100				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	450 °C

Abbildung 69: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel H100

Für marktgängige Kraftstoffe mit maximal 7 vol.-% FAME können hinsichtlich der Ablagerungsbildung auf heißen Oberflächen auf Basis der in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse Temperaturbereiche oberhalb 325 °C empfohlen werden. Hier lagen die bestimmten Ablagerungsmengen stets unterhalb von 10 mg/100 ml Kraftstoff.

Die beobachtete Kraftstoffdifferenzierung korreliert gut mit den Versuchen am realen Verdampfervlies aus Teilvorhaben 1 (siehe Abbildung 13). Der Tiegelverdampfer stellt somit eine gute, simplifizierte Testmethode zur Bestimmung der Neigung zur Ablagerungsbildung von Brenn- und Kraftstoffen dar.

In der folgenden Abbildung sind ergänzend die Ablagerungsmengen für den Kraftstoffblend aus Diesel mit 5 vol.-% Pflanzenöl dargestellt. Es wurde raffiniertes Rapsöl eingesetzt. Wie auch aus der fotographischen Dokumentation der Tiegel zu erkennen (Abbildung 71) sind die Ablagerungsmengen bei Temperaturen unter 400 °C im Vergleich zu den zuvor dargestellten Ergebnissen den Erwartungen entsprechend immens.

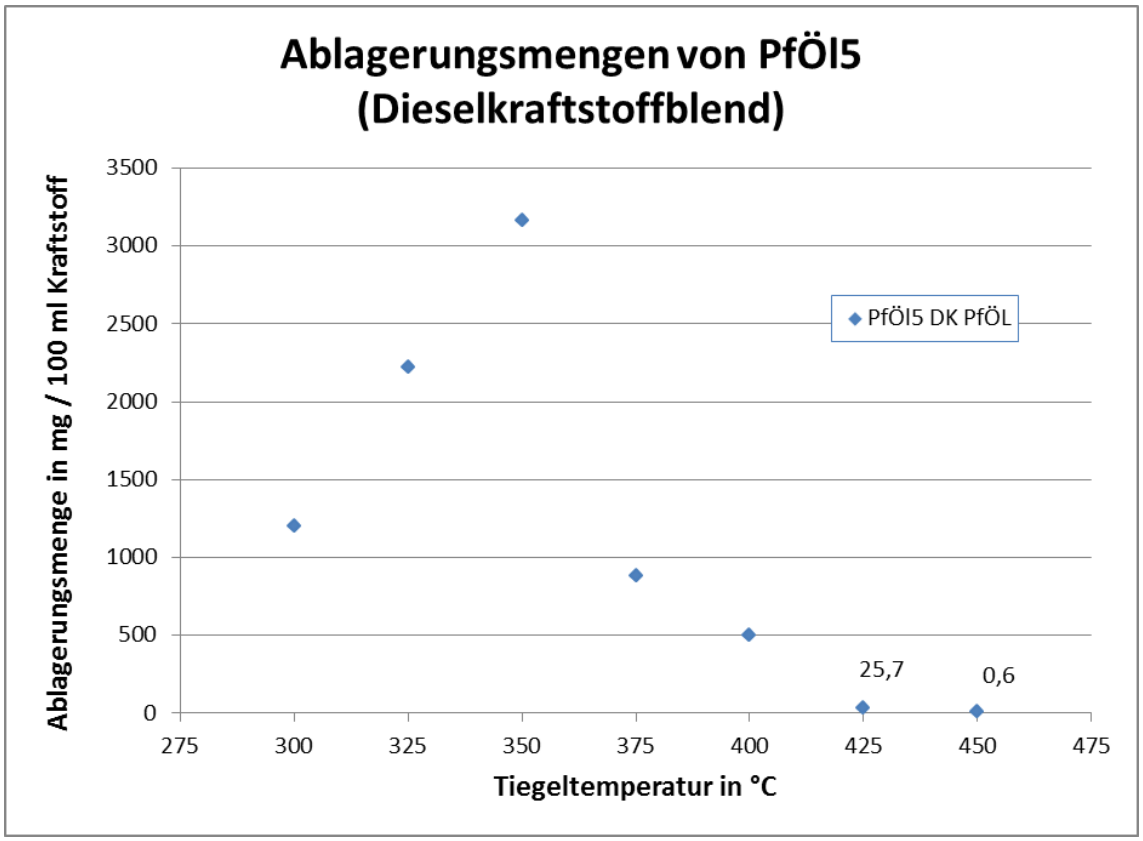


Abbildung 70: Ergebnisse des Tiegelverdampfungsprüfstand (Dieselkraftstoffblend PfÖl5)

Die Reduzierung der Ablagerungsmengen bei Tiegeltemperaturen 300 °C und 325 °C gegenüber der Tiegeltemperatur von 350 °C kann mit einem zeitweiligen „Überlaufen“ des Tiegels erklärt werden. Dieses kann auftreten, wenn Kraftstoffanteile (hier vermutlich der Pflanzenölanteil) nicht schnell genug verdampft, bevor der nächste Tropfen zugeführt wird. So findet über die Versuchszeit eine Kraftstoffakkumulation im Tiegel statt, welche zum Überlaufen führt. Somit können nicht alle entstandenen Ablagerungen messtechnisch erfasst werden. Die optische Auswertung der entsprechenden Tiegel unterstützt diese Annahme (Benetzung der gesamten Tiegelfläche und des Randes).

PfÖl5				
300 °C	325 °C	350 °C	375 °C	400 °C
425 °C	450 °C	… °C	… °C	… °C

Abbildung 71: Ablagerungen auf den Tiegelprüfkörpern bei Diesel PfÖl5

Hinsichtlich der Ablagerungsbildung von Dieselkraftstoffblends mit Pflanzenölanteil auf heißen Oberflächen werden auf Basis der in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse Temperaturbereiche oberhalb 425 °C empfohlen. Bei diesen hohen Temperaturen können demnach auch Kraftstoffe mit geringem Anteil an Pflanzenölen eingesetzt werden, ohne dass stark erhöhte Ablagerungsmengen zu erwarten sind. Sollen größere Anteile oder sogar reine Pflanzenöle eingesetzt werden, werden jedoch weitergehende Untersuchungen empfohlen.

2.4 Arbeitspaket: Einfluss Pumpenvariablen

Der Prüfstand zur Untersuchung des Einflusses der Schmierfähigkeit des Kraftstoffs auf die Lebensdauer der Hubkolbenpumpen (Verschleiß) wurde gemäß Abbildung 72 aufgebaut. Es wurden 12 separate Stränge aufgebaut und jeweils drei Pumpen mit demselben Kraftstoff getestet. So konnte der Einfluss von vier Kraftstoffen simultan geprüft werden. Es wurden zwei Prüfläufe durchgeführt und somit insgesamt 24 Pumpen in die Versuchsdurchführung einbezogen.

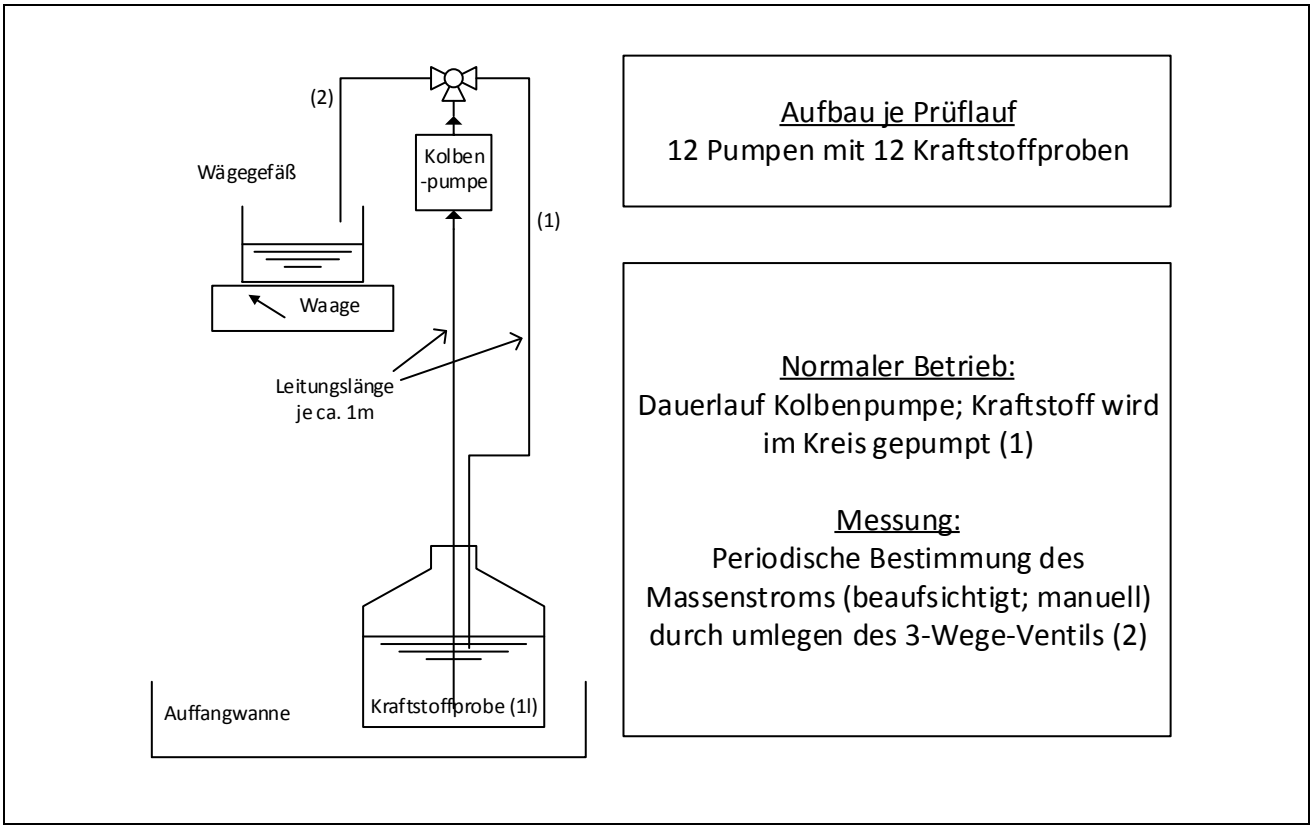


Abbildung 72: Schematischer Aufbau des Hubkolbenpumpenprüfstands (nur ein Strang dargestellt)

Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Prüfläufe dargestellt. Die Prüfparameter sind in Tabelle 6 angegeben. Zur Messung der Förderleistung wurde der Massenstrom periodisch zu den angegebenen Daten durch Wägung bestimmt (Abbildung 73 und Abbildung 74).

Tabelle 6: Prüfparameter des Hubkolbenpumpenprüfstands

Laufzeit:	Ca. 2300 Betriebsstunden	
Leitungslängen Saugleitung Druckleitung	 ca. 1 m ca. 1 m	
Kraftstoffvolumen	1 Liter je Pumpe	
i.O. Kriterium	max. -10 % Fördertoleranz	
Kraftstoffwechsel	Ggf. alle 550 Betriebsstunden	
Kraftstoffe:	**Prüflauf 1:** B0 (mineralölstämmiger Diesel) H100 HVO B30 RME (B0 + 30 % (V/V) RME) H50 (B0 + 50 % (V/V) HVO)	ohne Kraftstoffwechsel
	Prüflauf 2: B7 RME (B0 + 7 % (V/V) RME) B7 RME (B0 + 7 % (V/V) RME) B30 RME (B0 + 30 % (V/V) RME) B100 RME	ohne Kraftstoffwechsel mit Kraftstoffwechsel mit Kraftstoffwechsel mit Kraftstoffwechsel

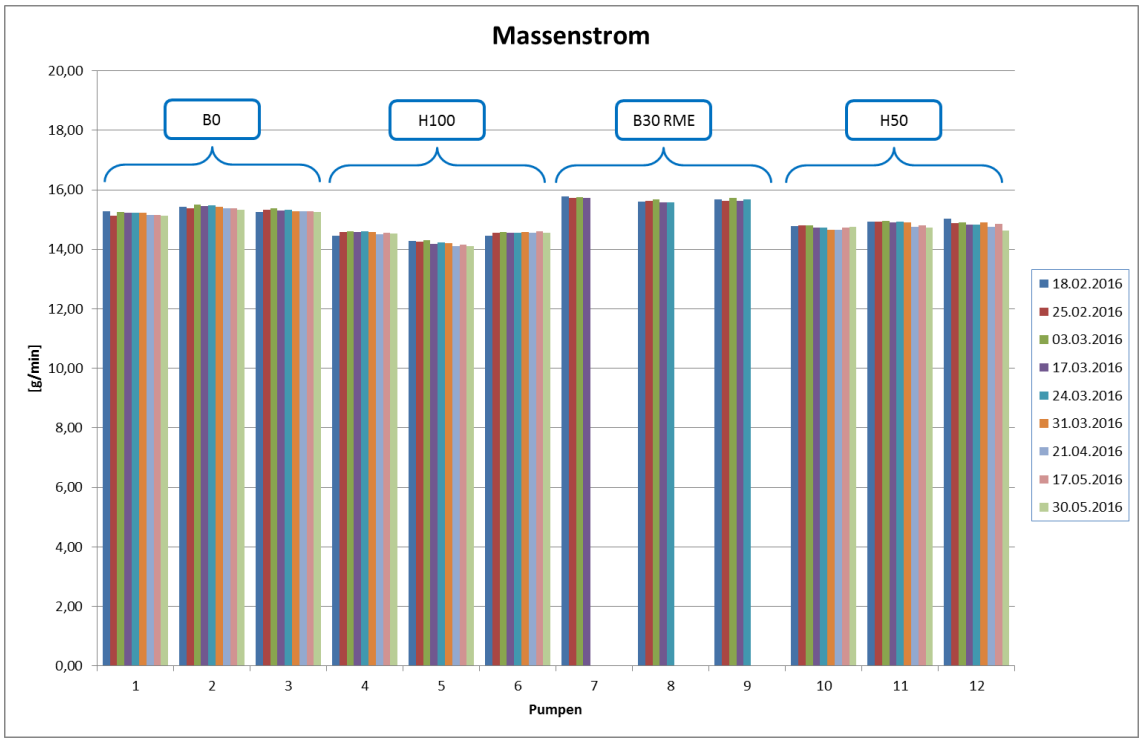


Abbildung 73: Gemessene Massenströme der untersuchten Hubkolbenpumpen (Prüflauf 1)

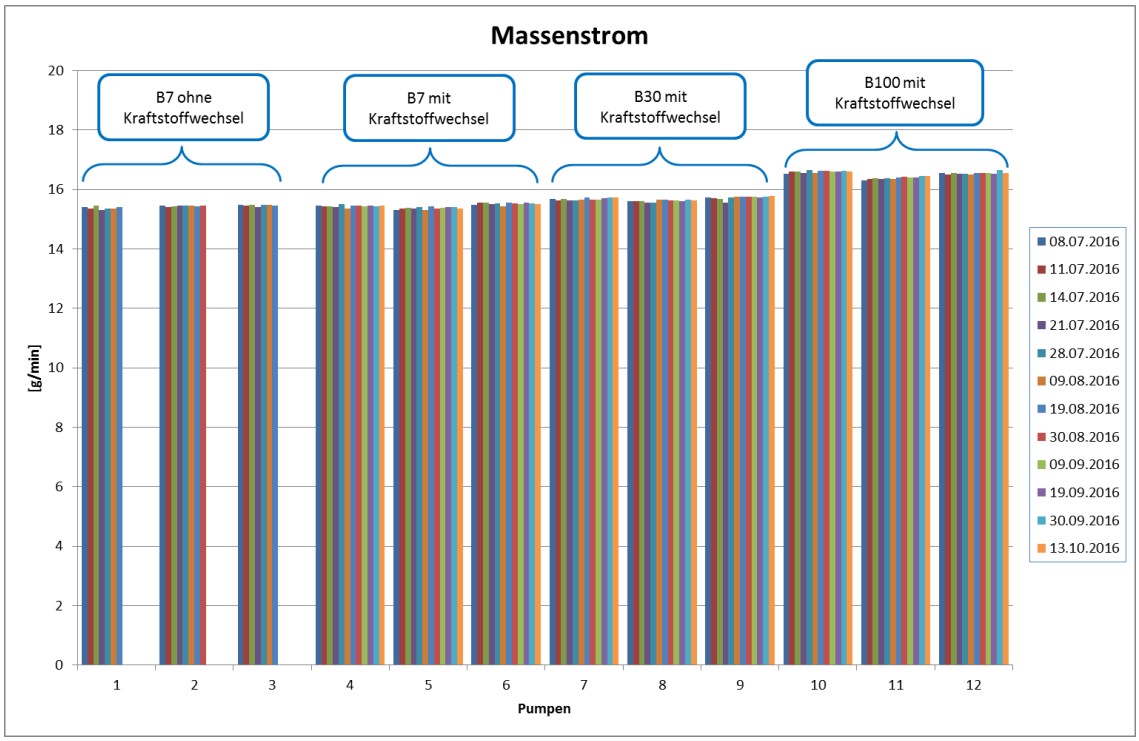


Abbildung 74: Gemessene Massenströme der untersuchten Hubkolbenpumpen (Prüflauf 2)

Anhand der experimentellen Daten beider Prüfläufe ist zu erkennen, dass die Förderleistung der Hubkolbenpumpen geringfügig vom Kraftstoff abhängt. Der größte Massenstrom wurde zu Versuchsstart beim Kraftstoff B100 gemessen (16,6 g/min) – der kleinste beim Kraftstoff H100 (14,27 g/min).

In **Prüflauf 1** sind die Pumpen 7, 8 und 9 mit dem Kraftstoff B30 nach ca. 900 Betriebsstunden ausgefallen. Diese Pumpenausfälle traten spontan auf und haben sich im Vorfeld nicht durch einen Abfall der Förderleistung angekündigt. Die Förderraten der übrigen Pumpen in Prüflauf 1 sind über die gesamte Versuchslaufzeit von ca. 2300 Stunden stabil. Der maximale Durchflussabfall betrug ca. 2,7 % (Pumpe 12, H50). Somit lag der beobachtete Abfall deutlich unter der als kritisch betrachteten Grenze von -10 % Fördertoleranz.

In **Prüflauf 2** wurden wiederum 12 Pumpen mit vier verschiedenen Kraftstoffmischungen getestet. Die Kraftstoffe der Pumpen 4 bis 12 wurden jeweils nach ca. 550 Betriebsstunden durch Frischware ersetzt, um Kraftstoffüberalterung zu vermeiden. Die drei Pumpen, welche mit *B7 o.Kw.* (ohne Kraftstoffwechsel) betrieben worden sind, sind kurz hintereinander nach ca. 1100 Betriebsstunden ausgefallen. Wie schon im ersten Prüflauf haben sich die Pumpenausfälle nicht durch eine vorherige Durchflussabnahme angedeutet. Dagegen konnten die übrigen Pumpen (mit mehrmaligem Kraftstoffwechsel) bis zur avisierten Laufzeit von ca. 2300 Stunden ohne Auffälligkeiten betrieben werden. Die jeweiligen Förderraten blieben für alle Pumpen über die Betriebszeit konstant.

Im Anschluss an die Prüfläufe wurden die Hubkolbenpumpen geöffnet und hinsichtlich Verschleißerscheinungen, Korrosion und ggf. Ablagerungsbildung untersucht. In den folgenden Abbildungen sind die Kraftstoffsiebe sowie die Kolbenstangen aller untersuchten Pumpen dargestellt.

Befundung der Pumpen – Prüflauf 1

B0 - Pumpe 1

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B0 - Pumpe 2

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B0 - Pumpe 3

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

- Alle drei Pumpen ohne wesentlichen Befund
- Im Kraftstoffsieb von Pumpe 1 sind minimale Ablagerungen zu finden

Abbildung 75: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 1 – Kraftstoff B0

B30 - Pumpe 1

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B30 - Pumpe 2

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B30 - Pumpe 3

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

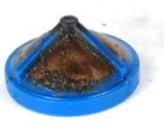
- Minimale Ablagerungsbildung auf den Kraftstoffsieben („schleimartig“)
- Pumpe 2 weist geringfügige Korrosions-erscheinungen auf dem Anker auf

Abbildung 76: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 1 – Kraftstoff B30

H50 - Pumpe 1

Kraftstoffsieb | Kolbenstange

H50 - Pumpe 2



Kraftstoffsieb | Kolbenstange

H50 - Pumpe 3

Kraftstoffsieb | Kolbenstange

- Die Kraftstoffsiebe aller drei Pumpen sind stark mit Ablagerungen besetzt
- Jedoch keine Abnahme des Durchflusses

Abbildung 77: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 1 – Kraftstoff H50

H100 - Pumpe 1

Kraftstoffsieb | Kolbenstange

H100 - Pumpe 2

Kraftstoffsieb | Kolbenstange

H100 - Pumpe 3*

\- | -

Kraftstoffsieb | Kolbenstange

- Alle beiden Pumpen ohne Befund

Abbildung 78: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 1 – Kraftstoff H100

*: Die Pumpe 3 wurden während des Öffnens massiv zerstört, sodass eine Begutachtung nicht möglich war.

Befundung der Pumpen – Prüflauf 2

B7 ohne Kraftstoffwechsel - Pumpe 1

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B7 ohne Kraftstoffwechsel - Pumpe 2

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B7 ohne Kraftstoffwechsel - Pumpe 3

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

- Alle drei Pumpen weisen Korrosion auf dem Anker auf
- In den Kraftstoffsieben konnten minimale Ablagerungsmengen festgestellt werden

Abbildung 79: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 2 – Kraftstoff B7 ohne Kraftstoffwechsel

B7 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 1

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B7 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 2

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B7 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 3

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

- Im Kraftstoffsieb von Pumpe 2 konnten geringfüge Ablagerungen festgestellt werden
- Pumpe 1 und 3 ohne Befund

Abbildung 80: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 2 – Kraftstoff B7 mit Kraftstoffwechsel

B30 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 1

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B30 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 2

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B30 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 3

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

- Im den Kraftstoffsieben von Pumpe 1 und 2 sind Ablagerungen feststellbar
- Die Pumpen 1 und 2 weisen Korrosion auf dem Anker auf
- Pumpe 3 ohne Befund

Abbildung 81: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 2 – Kraftstoff B30 mit Kraftstoffwechsel

B100 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 1

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B100 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 2

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

B100 mit Kraftstoffwechsel - Pumpe 3

Kraftstoffsieb

Kolbenstange

- In den Kraftstoffsieben aller Pumpen konnten Ablagerungen festgestellt werden („schleimartig“)
- Alle drei Pumpen weisen geringe Korrosions-erscheinungen auf dem Anker auf

Abbildung 82: Optische Befundung der Hubkolbenpumpen Prüflauf 2 – Kraftstoff B100 mit Kraftstoffwechsel

Im Zuge der Bewertung der Ergebnisse beider Prüfläufe wurden die Kraftstoffe nach Beendigung hinsichtlich der Metallgehalte mittels ICP-OES analysiert. Erhöhte Messwerte wurden bei den Metallgehalten von Zink und Kupfer festgestellt. Diese sind in Tabelle 7 (Prüflauf 1) und Tabelle 8 (Prüflauf 2) angegeben.

Tabelle 7: Metallgehalte (Zink, Kupfer) der Brennstoffe aus Prüflauf 1

Prüflauf 1	Laufzeit des Kraftstoffs	Zinkgehalt in mg/kg	Kupfergehalt in mg/kg
B0	2300 h	0,1	< 0,1
H100 HVO	2300 h	0,2	0,2
B30 RME	2300 h	< 0,1	< 0,1
H50 HVO	2300 h	< 0,1	< 0,1

Tabelle 8: Metallgehalte (Zink, Kupfer) der Brennstoffe aus Prüflauf 2

Prüflauf 2	Laufzeit des Kraftstoffs	Zinkgehalt in mg/kg	Kupfergehalt in mg/kg
B7 RME ohne Kraftstoffwechsel	ca. 2300 h	< 0,1	< 0,1
B7 RME mit Kraftstoffwechsel	ca. 500 h	0,2	0,1
	ca. 580 h	0,2	< 0,1
	ca. 540 h	0,2	< 0,1
	ca. 680 h	0,1	< 0,1
B30 RME mit Kraftstoffwechsel	ca. 500 h	0,9	0,2
	ca. 580 h	14,5	0,4
	ca. 540 h	4,7	0,2
	ca. 680 h	15,3	0,2
B100 RME mit Kraftstoffwechsel	ca. 500 h	10,0	3,9
	ca. 580 h	4,1	1,1
	ca. 540 h	2,8	4,8
	ca. 680 h	1,8	1,1

Zink und Kupfer sind Legierungsbestandteile der Pumpenwerkstoffe. Diese stehen in direktem Kontakt zum Kraftstoff, wodurch der Metalleintrag in die Brennstoffe erklärt werden kann. Höhere Konzentrationen könnten auf stärkeren Abrieb (Verschleiß) oder Korrosion hindeuten. So weisen die Pumpen 7 bis 12 aus Prüflauf 2 (*B30 m.Kw.* bzw. *B100 m.Kw.*) mehrheitlich Korrosionserscheinungen und die Kraftstoffproben vergleichsweise hohe Konzentrationen an Zink auf. Dagegen zeigt die Kraftstoffanalyse der Pumpen 1 bis 3 (ebenfalls mit Korrosionserscheinungen) keine erhöhten Metallgehalte. Da hier der Kraftstoff nicht ausgetauscht und somit überproportional beansprucht wurde, könnten entsprechend hohe Metallgehalte bereits sedimentiert sein, wodurch diese nicht mehr in der Kraftstoffanalyse sichtbar sind.

Im Allgemeinen ist festzuhalten, dass Korrosionserscheinungen lediglich bei FAME-haltigen Kraftstoffmischungen beobachtet werden konnten. Bei HVO-haltigen Kraftstoffen konnten keine negativen Effekte wie bspw. erhöhter Verschleiß festgestellt werden.

Signifikante Ablagerungsmengen im Kraftstoffsieb konnten lediglich in Prüflauf 1 beim Kraftstoffgemisch *H50* gefunden werden. Alle drei entsprechenden Pumpen wiesen eine starke Verschmutzung der Filter auf. Dennoch kam es in der hier durchgeführten Versuchszeit nicht zu einer Durchflussabnahme. Eine vergleichbare Phänomenologie ist aus der Literatur bekannt [27], jedoch derzeit nicht im Detail aufgeklärt.

2.5 Arbeitspaket: Untersuchung laminarer Flammgeschwindigkeiten

Im Fokus dieses Arbeitspakets lag die Optimierung des Heatflux-Prüfstandes hinsichtlich der Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit von Benzinfraktionen sowie Benzin-Alkohol-Gemischen. Da der Prüfstand am OWI für die Verwendung von gasförmigen Brennstoffen (CH4, H2-CH4-Gemische) oder einfachen Alkoholen (CH3OH, C2H5OH) ausgelegt war, mussten zunächst umfangreiche Modifikationen durchgeführt werden. Diese betrafen insbesondere die exakte Dosierung der flüssigen Kraftstoffe und deren rückstandsfreie Verdampfung. Hierzu wurde ein pulsationsarmer Laborverdampfer angeschafft, der eine gleichmäßige Verdampfung der Brennstoffe gewährleistet (siehe Abbildung 83).

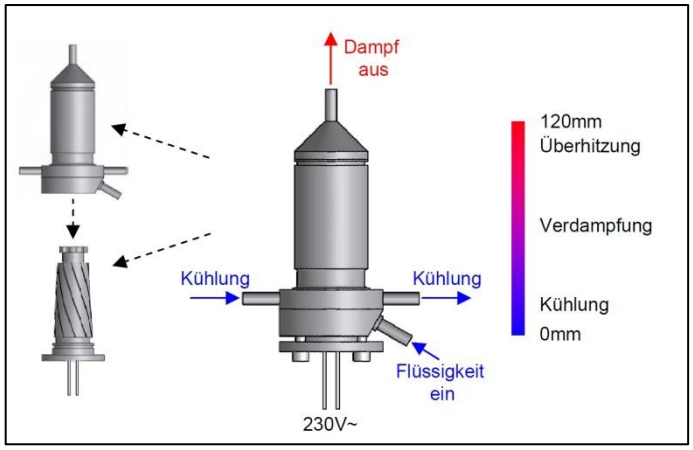


Abbildung 83: Heatflux-Verdampfer: Konzept

Für die exakte Dosierung der Brennstoffmischungen wurde ein System bestehend aus einer HPLC-Pumpe und einem Durchflussmesssystem beschafft und in die Prüfstandsinfrastruktur integriert. Des Weiteren wurde eine neue Brennerplatte angeschafft, um die Genauigkeit des Systems zu verbessern (siehe Abbildung 84). Zum einen wurden in der neuen Brennerplatte eine höhere Anzahl an Thermoelementen eingebracht (15 statt 8). Das Messergebnis wird dadurch verbessert. Zum anderen wurde der Durchmesser der Bohrungen auf 0,4 mm verkleinert, sodass bei gleichbleibender Gesamtfläche der Brennerplatte deren Anzahl erhöht werden konnte. Dieses führt zu einer besseren Stabilisierung der Flamme auf dem Brenner und einer gleichförmigeren Verbrennung (ein-dimensionale Flamme), welche substanziell für die Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeiten nach der Heatflux-Methode ist.

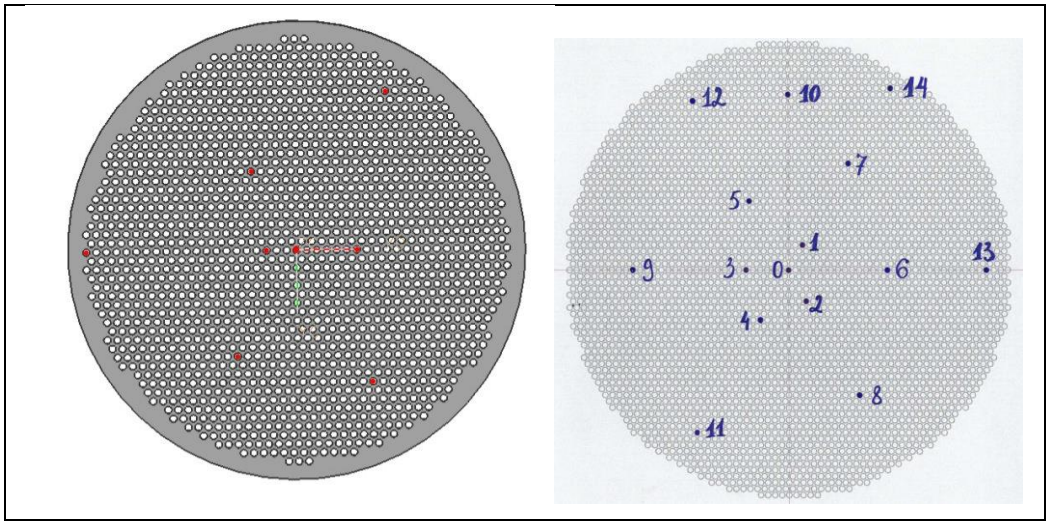


Abbildung 84: Heatflux-Brennerplatte: Vergleich der Geometrie „alt“ (links) und „neu“ (rechts)

Das Gesamtsystem wurde gemäß Abbildung 85 aufgebaut und für die Untersuchungen in diesem Projekt eingesetzt.

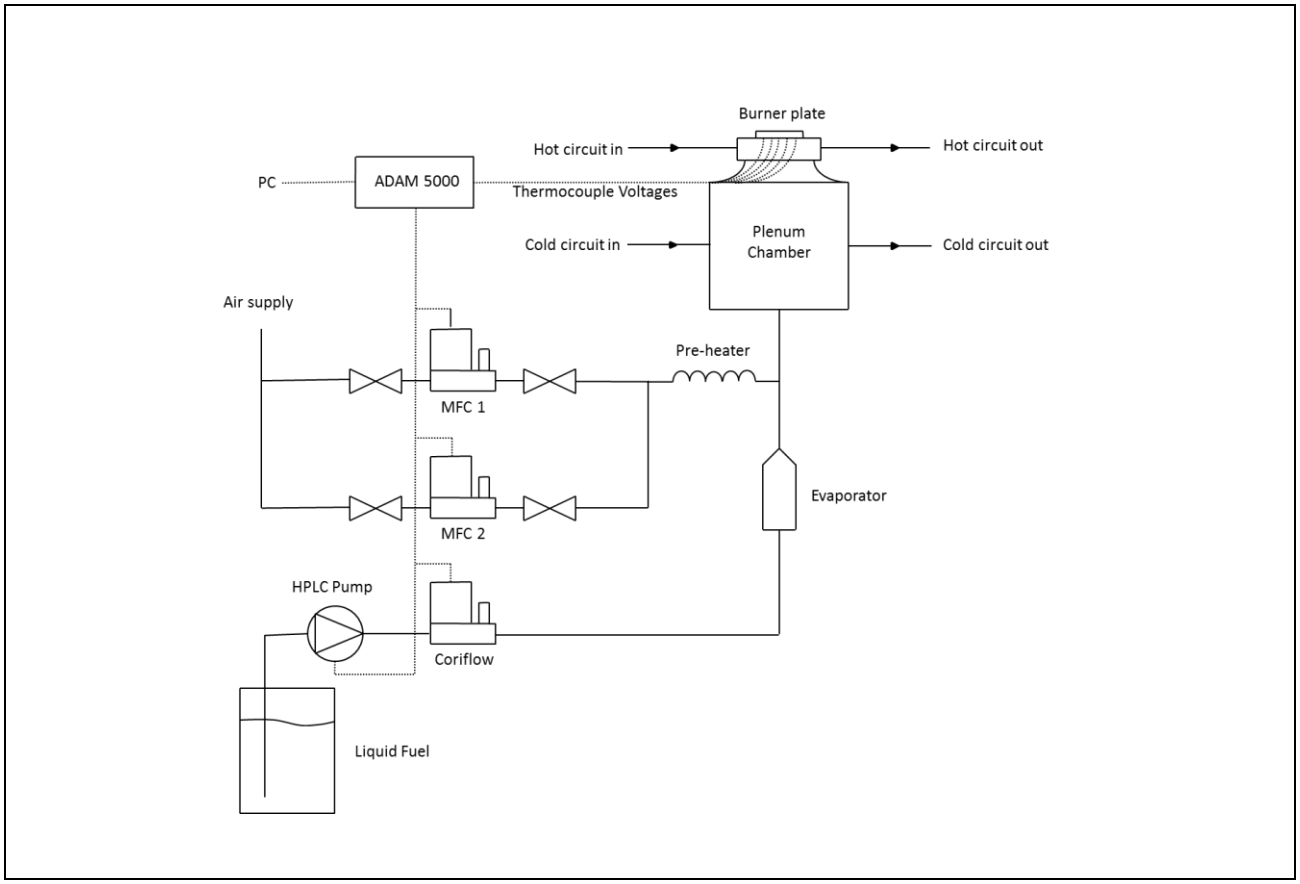


Abbildung 85: Heatflux-Prüfstand: Schematischer Aufbau

In Abbildung 86 sind gemessene Temperaturverläufe vor und nach der ersten Optimierungsphase dargestellt. Verglichen mit den vorherigen Temperaturverläufen ist zu erkennen, dass die Temperatur-Sensorwerte (Symbole) der neuen Brennerplatte weniger stark von dem parabolischen Fit (Linie) abweichen. Zudem laufen die Temperaturwerte im Bereich des äußeren Randes (r = 15 mm) zusammen, was für einen deutlich verbesserten Wärmeübergang zwischen Brennerplatte und der entsprechenden Temperierungseinheit spricht („hot circuit“ in Abbildung 85). Insgesamt stellt die neue Brennerplatte eine signifikante Verbesserung des Gesamtsystems dar.

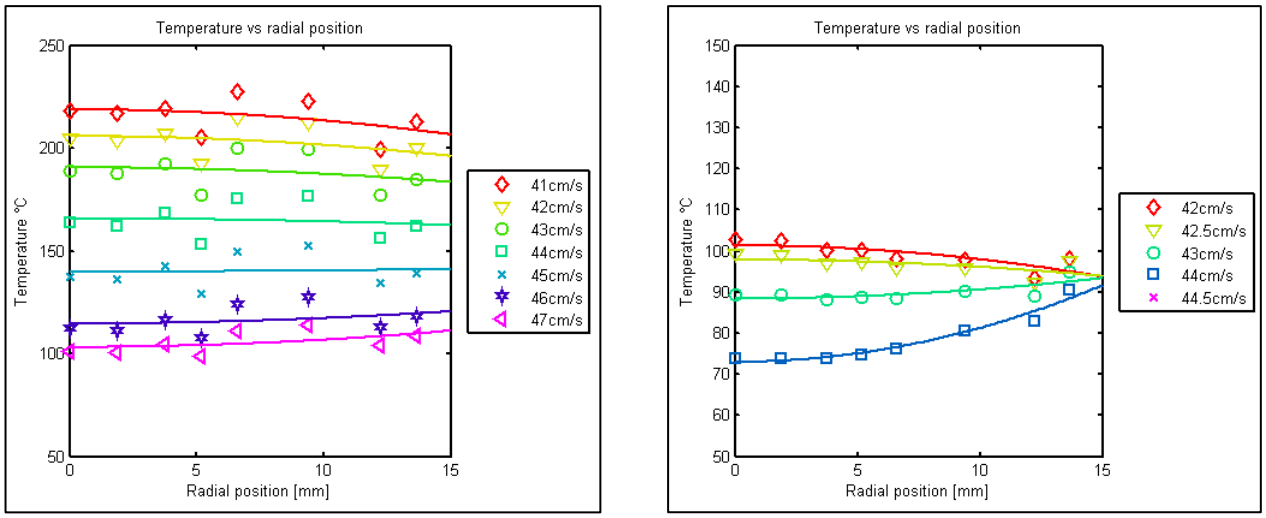


Abbildung 86: Heatflux-Prüfstand: Zwischenergebnisse der Optimierungsphase. Vor Optimierung (links) und nach Optimierung (rechts)

Nach Abschluss der Umbaumaßnahmen wurde mit der Bestimmung laminarer Brenngeschwindigkeiten zunächst von Ethanol begonnen. Für Ethanol liegen umfangreiche Literaturdaten vor, sodass die Präzision des neuen Heatflux-Systems bestimmt werden konnte. Als Referenztemperatur wird stets die Temperatur des unverbrannten Gasgemischs kurz unterhalb der Brennerplatte angegeben. Diese beträgt für alle im Folgenden dargestellte Ergebnisse 338 K (ca. 65 °C). Das Brennstoff-Oxidator-Verhältnis wird typischerweise mit $\Phi = 1/\lambda$ bezeichnet. Das allgemeine Vorgehen zur Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit eines Brennstoff-Luft-Gemischs wird anhand des Beispiels Ethanol-Luft beschrieben:

Die Massenströme (Brennstoff und Luft) werden gemäß der Vorgaben der Stöchiometrie (Φ) und der avisierten Gasgeschwindigkeit eingestellt. Die Flamme stabilisiert sich auf der Brennerplatte. Ein stabiler thermischer Zustand des Systems wird typischerweise nach 30 Betriebsminuten erreicht.

Die Versuchsdurchführung erfolgt in der Regel so, dass eine Gasgeschwindigkeit unterhalb der erwarteten adiabaten laminaren Brenngeschwindigkeit gewählt wird. Es entsteht ein Temperaturprofil mit über dem Radius der Brennerplatte fallendem Verlauf. Ausgehend von dieser Gasgeschwindigkeit wird diese schrittweise um 1 cm/s erhöht, bis eine ausreichende Anzahl von Messkurven zum Interpolieren auf ein flaches Temperaturprofil vorliegen. Die gewählte Mindestanzahl liegt bei sieben Messkurven. Die gewonnenen Messdaten werden nun mit einer parabolischen Anpassungsfunktion (ohne Linearanteil) versehen (siehe Abbildung 87). Im zweiten Schritt (Abbildung 88) werden die Parabolkoeffizienten über der Gasgeschwindigkeit aufgetragen und die Nullstelle linear interpoliert. Die Nullstelle gibt den gesuchten Wert für die laminare Brenngeschwindigkeit an und wird üblicherweise in der Einheit cm/s angegeben.

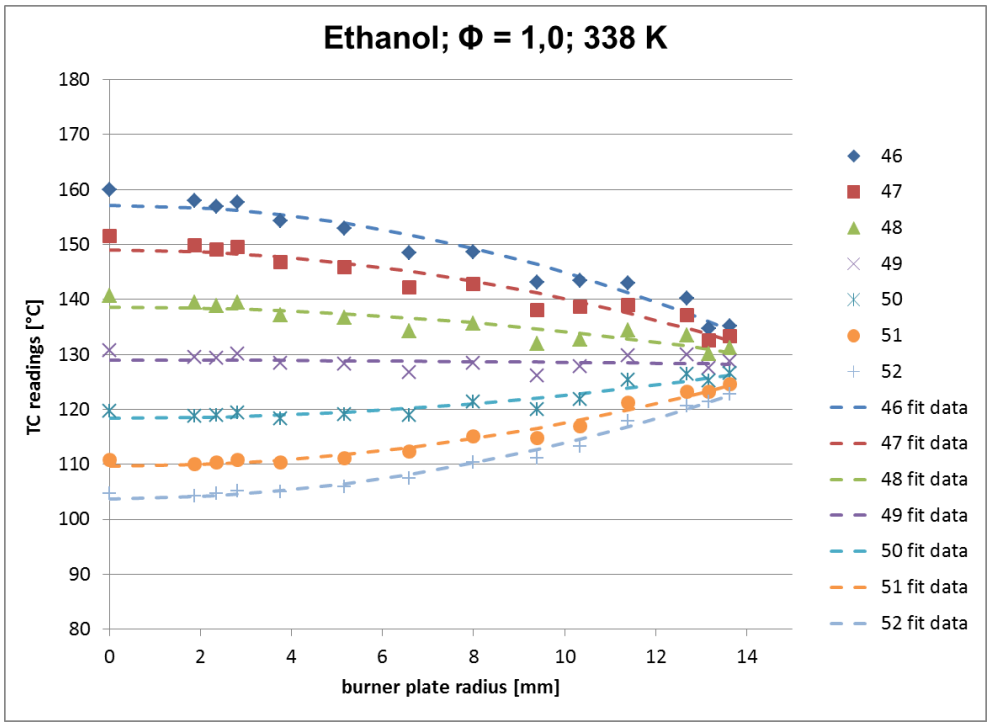


Abbildung 87: Heatflux-Prüfstand: Messergebnisse für Ethanol bei Φ = 1,0

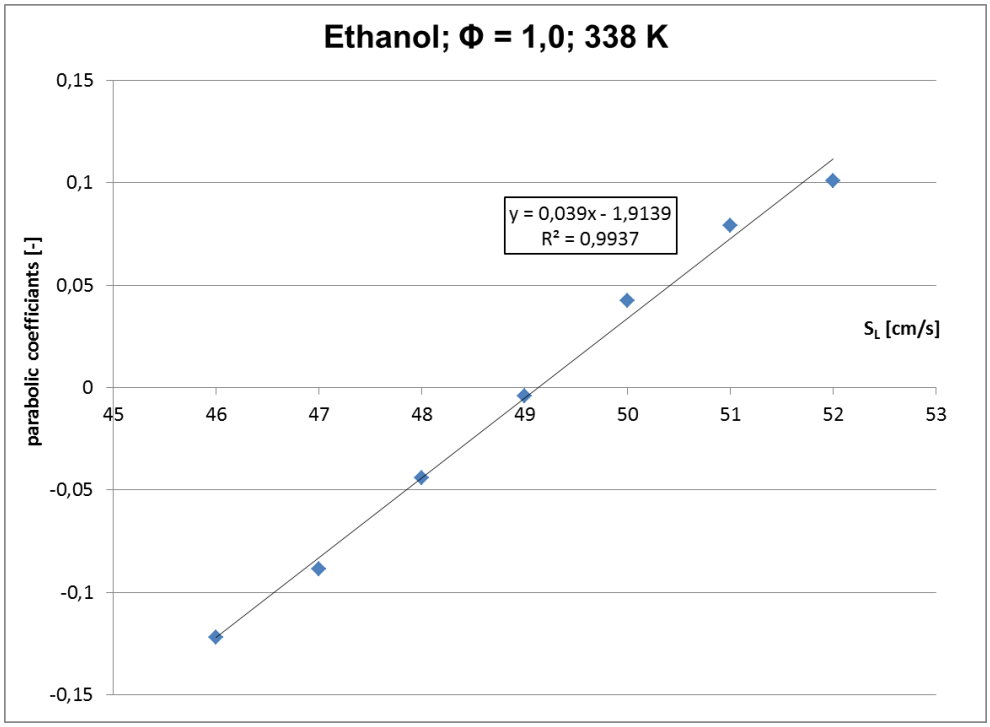


Abbildung 88: Heatflux-Prüfstand: Darstellung der Polynomkoeffizienten am Beispiel Ethanol bei Φ = 1,0

Die Auswertung der Messdaten wurde mit Hilfe von MS Excel weitestgehend automatisiert. Die Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit mittels Heatflux-Methode wurde für die in Tabelle 9 angegebenen Brennstoffe bzw. Brennstoffmischungen durchgeführt. Analysedaten des eingesetzten Benzins sind im Anhang aufgeführt.

Tabelle 9: Kraftstoffmatrix für die Heatflux-Untersuchungen

	Nr.	Bezeichnung				
Heatflux-Prüfstand	1	Ethanol	Ethanol	100 %		
	2	Benzin (*Gasoline*)	Benzin	100 %		
	3	E5	Benzin	95 %	Ethanol	5 %
	4	E10	Benzin	90 %	Ethanol	10 %
	5	E25	Benzin	75 %	Ethanol	25 %
	6	E50	Benzin	50 %	Ethanol	50 %
	7	E85	Benzin	15 %	Ethanol	85 %
	8	EtOH_10w	Ethanol	90 %	Wasser	10 %
	9	Benzin_10w	Benzin	90 %	Wasser	10 %
Temperatur des unverbrannten Gasgemischs:					338 K (ca. 65 °C)	
Variation des Äquivalenzverhältnisses (Φ):					0,7 – 1,3*	

*: sofern möglich. Bei niedrigen oder hohen Äquivalenzverhältnissen kann es zu einer instabilen Verbrennung kommen. Messungen sind dann ggf. nicht möglich bzw. nicht auswertbar (s.u.).

Beispielhaft sind in Abbildung 89 und Abbildung 90 die Temperaturmessdaten und deren grafische Auswertung für *Benzin* und *E10* bei Φ = 1,0 gezeigt.

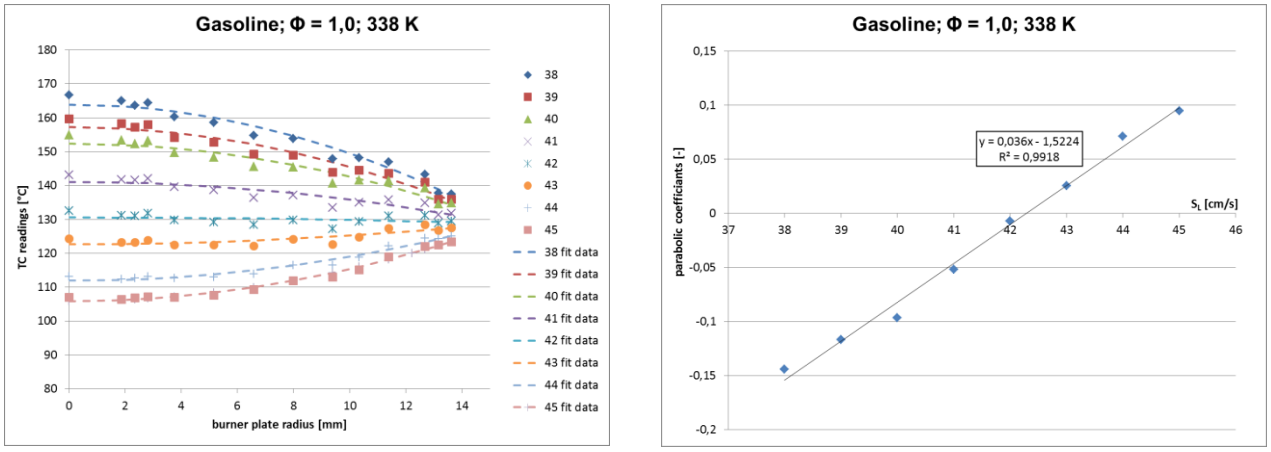


Abbildung 89: Heatflux-Prüfstand: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse (links) und Polynomkoeffizienten (rechts) für Benzin (Gasoline, E0) bei Φ = 1,0

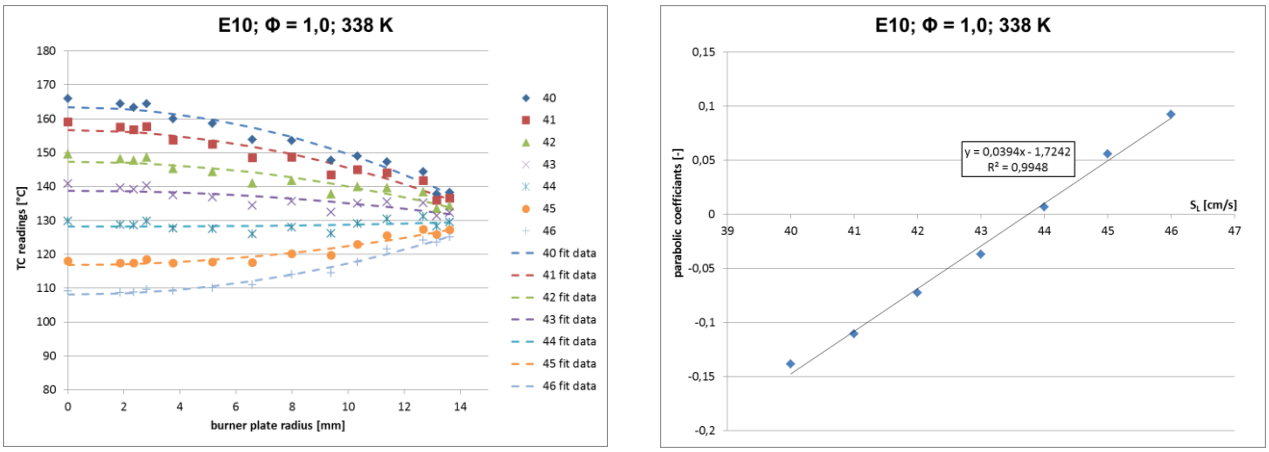


Abbildung 90: Heatflux-Prüfstand: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse (links) und Polynomkoeffizienten (rechts) für E10 bei Φ = 1,0

Die dargestellten Temperaturmesswerte (jeweils Diagramme links) zeigen verlässliche Werte bei optimalen Versuchsbedingungen. Die Temperaturkurven sind gleichmäßig verteilt und konvergieren in Richtung r = 15 mm. Es sind Messungen unterhalb und oberhalb der erwarteten laminaren Brenngeschwindigkeit durchgeführt worden. Entsprechend besitzen die Anpassungsfunktionen (lineare Interpolation, jeweils rechts) sehr hohe Anpassungsgüten ($R^2 > 0,99$). Die mittels Nullpunktbestimmung errechneten Geschwindigkeiten betragen 42,3 cm/s (*Benzin*) und 43,9 cm/s (*E10*).

In Abbildung 91 sind Messdaten bei instabiler Verbrennung dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Messung bei höherem Äquivalenzverhältnis (Φ = 1,2) mit *E10*. In diesem Betriebspunkt war es nicht möglich eine stabile Flammenfront auf der Brennerplatte zu stabilisieren.

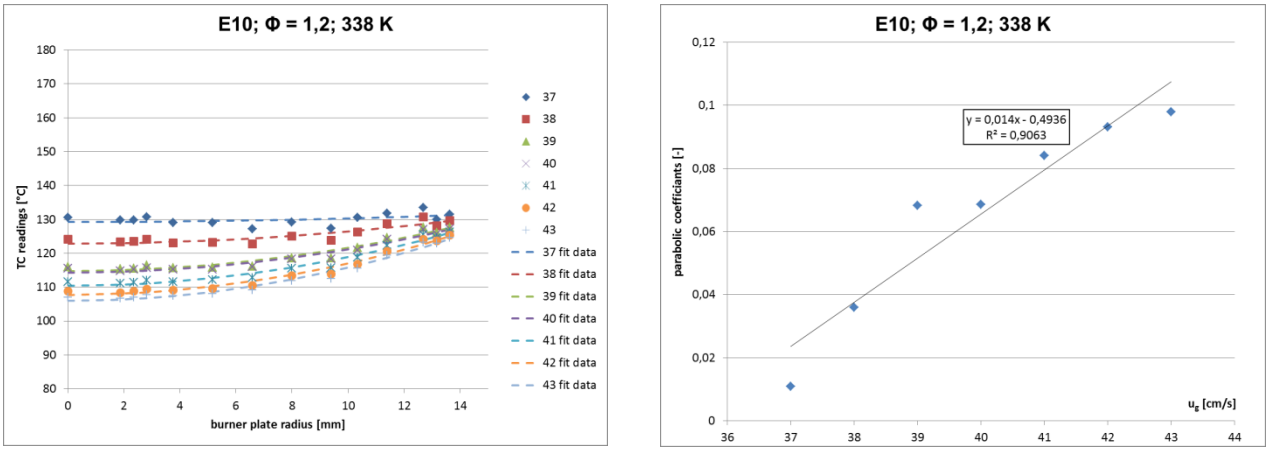


Abbildung 91: Heatflux-Prüfstand: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse (links) und Polynomkoeffizienten (rechts) für E10 bei Φ = 1,2

Die auftretenden Instabilitäten begünstigten das Ausbilden von mehreren kleinen Flammenkegeln, sodass keine validen Versuchsbedingungen vorlagen (keine ein-dimensionale Flamme). Die gemessenen Temperaturdaten in der Brennerplatte sind daher nicht für die Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit verwendungsfähig. Die hydrodynamischen Instabilitäten sind aus der Literatur bekannt [28] [29] und beruhen auf lokal unterschiedlichen Gemischzusammensetzungen innerhalb der Verbrennungszone. Sie können insbesondere bei kleinen und großen Werten für Φ auftreten. Entgegen der ursprünglichen Planung konnte die Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit aufgrund der beschriebenen instabilen Verbrennung für die Benzin-Ethanol-Blends E25, E50 sowie E85 nicht durchgeführt werden.

In Abbildung 92 sind exemplarische Messdaten der Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit von Ethanol mit Wasseranteil (10 vol.-%) dargestellt.

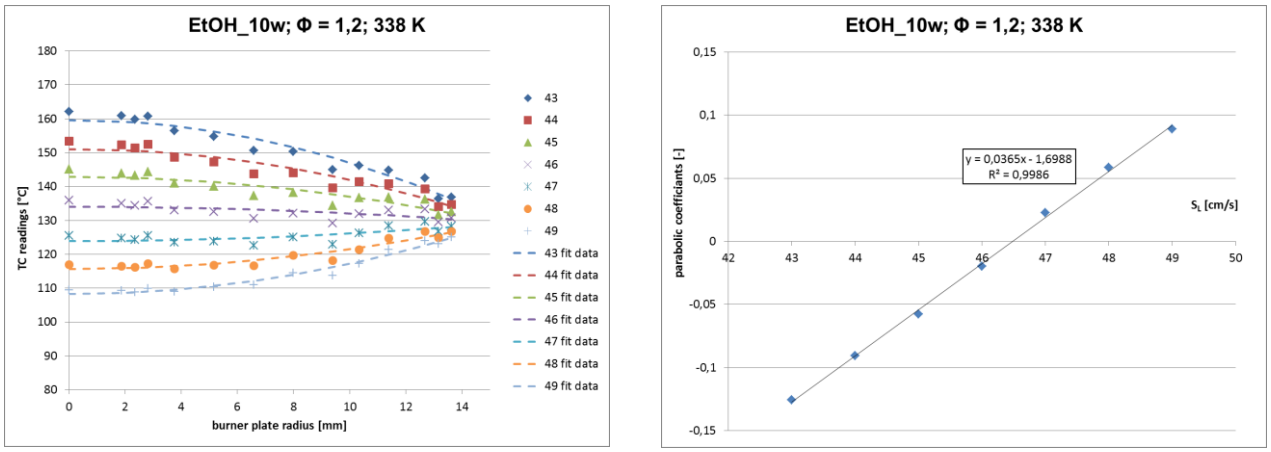


Abbildung 92: Heatflux-Prüfstand: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse (links) und Polynomkoeffizienten (rechts) für EtOH_10w (Ethanol mit 10 vol.-% Wasser) bei Φ = 1,2

Im Vergleich mit den Ergebnissen reines Ethanols zeigt sich eine geringere Brenngeschwindigkeit. Diese beträgt bei Φ = 1,2 ca. 46,4 cm/s und liegt damit im erwarteten Bereich.

Werden alle validen Ergebnisse in ein Diagramm übertragen zeigen sich die in Abbildung 93 dargestellten Zusammenhänge. Aufgetragen ist die laminare Brenngeschwindigkeit S_L („*laminar burning velocity*“) in Abhängigkeit des Äquivalentverhältnis Φ für verschiedene Brennstoffe. Es zeigt sich generell eine starke Abhängigkeit von Φ für alle Brennstoffe.

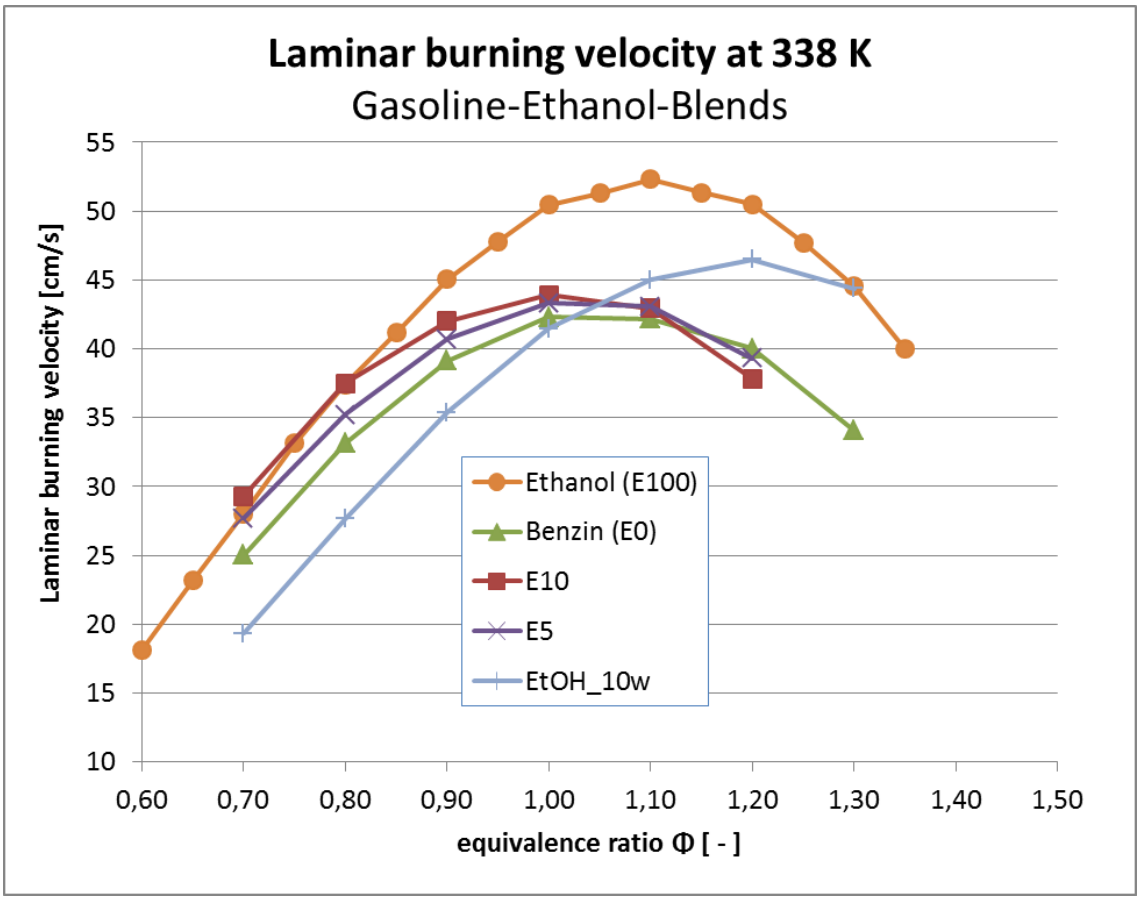


Abbildung 93: Zusammenstellung der Ergebnisse zur Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit von Benzin, Ethanol sowie deren Mischungen

Die laminaren Brenngeschwindigkeiten der untersuchten Brennstoffe unterscheiden sich signifikant im Bereich $\Phi > 1{,}0$. Es zeigen sich Differenzen von bis zu 11 cm/s ($\Phi = 1{,}2$). Im Bereich $\Phi = 0{,}9$ und darunter werden vergleichbare Brenngeschwindigkeiten ermittelt. Für reines Ethanol werden die höchsten Brenngeschwindigkeiten gemessen. Diese liegen bei $\Phi = 1{,}1$ bei ca. 52,0 cm/s. „Reines“ Benzin ohne Ethanolbeimischung erreicht Brenngeschwindigkeiten von maximal ca. 42,3 cm/s.

Wird einem Brennstoff Wasser beigemischt (siehe EtOH_10w) verringert sich die laminare Brenngeschwindigkeit je nach Betriebspunkt (Φ) zum Teil deutlich. Das entspricht den Erwartungen. Nicht den Erwartungen entspricht jedoch hier die Verschiebung der maximalen Brenngeschwindigkeit hin zu einem höheren Wert für Φ. Erwartet wurde eine gleichförmige Absenkung der Brenngeschwindigkeit über den gesamten Bereich von Φ („Parallelverschiebung“). Möglicherweise liegt hier ein Fehler in der Gemischberechnung vor. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts konnte dieses jedoch nicht geklärt werden.

Im technisch relevanten Bereich $\Phi \leq 0{,}9$ (magere Verbrennung) ist die Streuung der Brenngeschwindigkeiten der untersuchten Brennstoffe insgesamt betrachtet als gering zu bezeichnen (ca. ± 2,5 cm/s). Das bedeutet, dass technische Systeme mit entsprechendem Auslegungspunkt hinsichtlich der Brennraumgestaltung unempfindlicher auf Änderungen der Kraftstoffzusammensetzung reagieren.

3 Fazit

3.1 Zusammenfassung

Sowohl der Verdampferprüfstand als auch die Tiegelverdampfer für Diesel- und Ottokraftstoffe können wie beabsichtigt in Betrieb genommen werden. Alle geplanten Versuchsreihen werden durchgeführt und liefern zuverlässige Ergebnisse. In beiden Teilvorhaben wird ein signifikanter Einfluss der Temperatur auf die Bildung von Ablagerungen festgestellt, der Vergleich des Temperatureinflusses zeigt eine gute Korrelation zwischen den Prüfmethoden. In allen Fällen ist eine Zunahme der Rückstände bei sinkenden Temperaturen vorhanden. Bei den Dieselkraftstoffblends kommt es unterhalb von 400 °C zu einem signifikanten Anstieg der Ablagerungsmenge, die feinere Temperaturabstufung in den Tiegelversuchen und die ausgeweitete Brennstoffmatrix differenzieren dieses Bild. So ist die Beimischung von Fettsäuremethylester (FAME) zum mineralölstämmigen Basis-Kraftstoff generell für eine Erhöhung der notwendigen Temperaturen für eine ablagerungsarme Brennstoffaufbereitung verantwortlich. Ottokraftstoffe bilden bevorzugt unterhalb 300 °C Rückstände, am Verdampferprüfstand kann eine Vervielfachung nicht-flüchtiger Substanzen bei 100 °C an der Rückwand im Vergleich zu höheren Temperaturen gezeigt werden.

Der ermittelte Einfluss von biogenen Komponenten im Kraftstoff entspricht in vielen Punkten der Erwartung. Eine Zumischung von FAME zu fossilem Dieselkraftstoff führt auf beiden Prüfständen generell zu einer verstärken Ablagerungsbildung, wobei der Biodiesel-Feedstock wesentlichen Einfluss auf die Menge der Rückstände aufweist. Besonders die vielen ungesättigten Fettsäuren im Sojamethylester (SME) können die Ablagerungsmasse im Vergleich zu günstigeren Fettsäureverteilungen verdoppeln. Ottokraftstoffe profitieren bzgl. der Ablagerungsneigung durchweg von einer Beimischung einwertiger Alkohole (Ethanol, Methanol, 1-Butanol).

Entgegen der Erwartung führen hydrierte Pflanzenöle (HVO) im Dieselkraftstoff nicht zu einer verringerten Rückstandsbildung, eine Zunahme ist allerdings ebenfalls nicht zu erkennen. Somit ist bzgl. der Ablagerungsbildung die Substitution von fossilem Diesel durch einen derartigen, rein paraffinischen Bio-Kraftstoff bei Standheizungen denkbar, eine Erhöhung der Geräte-Lebensdauer ist hingegen nicht zu erwarten. Bereits eine geringe Beimischung von reinem Pflanzenöl zum Basisdiesel führt am Verdampfer- und am Tiegelprüfstand zu einem starken Anstieg der Rückstandsmengen. Zwingend für eine Verwendung derartiger Kraftstoffe wäre damit eine Modifikation des Brenners mit Verdampfertemperaturen oberhalb 425 °C.

Der Einfluss der Verdampfereigenschaften auf die Ablagerungsbildung ist deutlich geringer als erwartet und in vielen Fällen nahezu vernachlässigbar. Lediglich ein Metalldrahtgestrick ist beim Ottokraftstoff in der Lage, die Rückstandsmenge signifikant zu verringern. Der Einsatz eines Vlieses aus mineralischen Fasern führt beim Dieselkraftstoff zu einer Verzehnfachung der zurückbleibenden Substanzen, was auf die niedrige Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit der hohen Kapillarität des Materials zurückgeführt wird.

Für die Bestimmung der Zusammensetzung und möglicher Bildungsmechanismen der vorhandenen Ablagerungen und für Aussagen zu einer möglichen Regeneration geschädigter Verdampfer werden unterschiedliche Methoden der Befundung und Stoffanalytik angewendet. Besonders die eingesetzte Infrarot-Spektroskopie und Gaschromatografie zeigt, dass Ablagerungen im Verdampfer überwiegend aus destillativ aufkonzentrierten, schwersiedenden Brennstoffbestandteilen bestehen, teilweise bereits vermengt mit oxidativen Abbauprodukten. Beim FAME dominieren daneben mit Phytosterinen charakteristische Pflanzenstoffe, die sich aufgrund ihrer Temperaturstabilität im Verdampfer anreichern. Speziell bei Ottokraftstoff können Hinweise auf einen Einfluss des Kraftstoffadditivs Polyisobutylen-Succinimid (PIBSI) auf die Rückstandsbildung gefunden werden.

Die Raman-Spektroskopie eignet sich zum Nachweis hoch kohlenstoffhaltiger Ablagerungen und ergibt besonders im Fall von FAME viele derartige Residuen auf der Rückseite des Verdampfers, die im realen Brenner als besonders kritisch für die Lebensdauer zu bewerten sind. Ob eine Regeneration der Verdampfer im Betrieb einer Standheizung denkbar ist, zeigen besonders die durchgeführten thermogravimetrischen Untersuchungen. Ablagerungen aus Ottokraftstoff (E10) könnten demnach in bestimmten Betriebspunkten des Brenners thermisch verringert werden, während Diesel (B0) sowie Biodiesel (B100) temperaturstabilere Rückstände bildet, deren vollständige Entfernung eine Anpassung des Temperaturhaushalts des Brenners erfordern würde.

Das Arbeitspaket betreffend den Kraftstoffeinfluss auf die Funktion von Hubkolbendosierpumpen bestätigt die prinzipielle Verwendbarkeit der existierenden Pumpen für fossile und regenerative Brennstoffe wie Diesel, Biodiesel (FAME) und hydrierte Pflanzenöle (HVO). Daneben zeigt sich allerdings durch

reproduzierbare Ausfälle die Kritikalität der Alterung von FAME auf die Lebensdauer der Pumpen, auch bereits bei geringen Beimischungen wie im Fall von Diesel B7 RME. Die im Versuchsaufbau eingesetzte Kreisförderung des Brennstoffs und die dadurch bewirkte Anreichung von Metallionen und starke Alterung der FAME-Blends entspricht zwar nicht dem typischen Einsatzfall in der Realität, macht aber die Gefahr der Kraftstoffalterung z.B. bei längeren Standzeiten des Heizungssystems deutlich. Unerwartet ist die deutliche Rückstandsbildung im Bereich des Bauteilschutzfilters bei Verwendung von Diesel mit 50 % hydrierten Pflanzenölen (HVO). Zwar kommt es hier im betrachteten Prüfzeitraum nicht zu einer Funktionseinschränkung der Pumpen, allerdings muss dieser, bislang kaum bekannte Effekt bei einem Feldeinsatz von HVO berücksichtigt werden.

Der Heatflux-Prüfstand kann im Rahmen des Arbeitspakets zur Untersuchung der laminaren Flammgeschwindigkeit von Ottokraftstoff-Alkohol-Blends wesentlich optimiert werden. Durch Austausch der Pumpe und die Anpassung der Brennerplatte kann eine gute Übereinstimmung mit Referenzwerten aus der Literatur erreicht werden. Die anschließenden Testreihen bilden eine zuverlässige und umfassende Datengrundlage bzgl. der Flammgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Benzin-Ethanol/Methanol/Butanol-Blends.

3.2 Verwertung

Für Webasto können die in diesem Projekt gewonnenen Ergebnisse direkt in der Vor- und Serienentwicklung von Standheizungsbrennern verwendet werden. So ist der nun detailliert quantifizierte Temperatureinfluss auf die Ablagerungsbildung im porösen Medium eine wichtige Eingangsgröße für die Auslegung des Temperaturhaushalts im Bereich des Verdampfers. Kundenanforderungen bzgl. erhöhter Beimischungen von FAME zum Dieselkraftstoff oder den Einsatz von HVO als Brennstoff können gezielt bearbeitet werden. Dabei werden durch Berücksichtigung der besonderen Anforderungen dieser Brennstoffe in einer frühen Phase der Entwicklung Zeit und Kosten gespart, da Entwicklungsschleifen durch unerwartete Ergebnisse in den Lebensdauerprüfungen vermieden werden. Auch für bislang nicht verwendbare biogene Brennstoffe wie Pflanzenöl sind nun die notwendigen Rahmenbedingungen bzgl. der Brennerauslegung bekannt, die eine zuverlässige langfristige Nutzung auch in diesem Fall ermöglichen können. In der analytischen Vorauslegung der Brennraumgeometrie können nun basierend auf der Messung der laminaren Flammgeschwindigkeit der Benzin-Alkohol-Blends auch diese biogenen Kraftstoffe entsprechend berücksichtigt werden. Zudem wird die Auswahl eines geeigneten Verdampfermediums, die bislang überwiegend aufgrund empirischer Untersuchungen erfolgt, durch die erlangten Erkenntnisse deutlich unterstützt. Die Daten zum Brennstoffeinfluss, speziell der Einfluss der Fettsäureverteilung im FAME auf die Rückstandsbildung, eignen sich zur Definition eines Worst-Case-Kraftstoffs, mit dem – bei nun bekanntem Raffungsfaktor – Versuchszeit eingespart werden kann.

In diesem Verbundvorhaben werden auch wesentliche Erkenntnisse erarbeitet, die die Funktion von Hubkolbendosierpumpen bei Verwendung von Bio-Kraftstoffen betreffen. Für eine zukünftige Überarbeitung dieser System-Komponente zur Sicherstellung der Kompatibilität mit neuen, regenerativen Treibstoffen sind nun die Grundlagen für eine geeignete Materialauswahl und entsprechende Prüfbedingungen geschaffen.

Des Weiteren ist auch ein erheblicher Wert der gewonnenen Daten bei der laufendenden, serienbegleitenden Qualitätssicherung gegeben. Das Hintergrundwissen bzgl. der Bildung von Ablagerungen im Brenner und der Kraftstoff-Pumpe kann in einer Vielzahl von Fällen die vielfach aufwendige Suche nach den Grundursachen von Feldausfällen unterstützen. Hier seien speziell Fälle von mit Pflanzenöl verunreinigtem Kraftstoff und durch lange Betriebsstillstände stark gealterter, FAME-haltiger Diesel genannt. Die Vielzahl der in diesem Projekt eingesetzten Methoden zur Stoff-Analytik bildet eine wertvolle Grundlage zur gezielten zukünftigen Auswahl einer geeigneten Methode für unterschiedliche Fragestellungen.

Das Projekt stellt außerdem einen validierten Prüfstand zur In-Vitro-Untersuchung der Ablagerungsbildung in porösen Medien zur Verfügung. In kommenden Arbeitspaketen sollen weitere Nebeneinflüsse wie der zeitliche Temperaturverlauf am Ende der Brennstoffförderphase oder die Einbaulage des Verdampfers evaluiert werden. Das vorhandene Messsystem zusammen mit den bereits gewonnenen Daten eignet sich ebenfalls für eine Schnell-Qualifizierung von neuartigen Verdampfermaterialien und bislang unbekannten Brennstoffblends. So kann innerhalb kurzer Zeit auf neue Marktanforderungen, insbesondere bzgl. alternativer Bio-Kraftstoffe reagiert werden. Die Einsparung von Versuchskosten durch Vermeidung von aufwändigen Lebensdauer-Tests ganzer Heizgeräte ist ein zusätzlicher Vorteil des erarbeiteten Prüfaufbaus.

Für das Oel-Waerme-Institut liegt der Nutzen des Projektes im Wesentlichen im erzielten Erkenntnisgewinn. Abgesehen von der Vertiefung entsprechender wissenschaftlicher Kompetenzen stehen dem OWI nach Abschluss des Projektes neue bzw. verbesserte Prüfmethoden zur Verfügung, welche beispielsweise in Forschungsaufträgen der Industrie verwendet werden können.

Im Bereich der Nutzung alternativer Brenn- und Kraftstoffe konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich des Verdampfungsverhaltens sowie der Ablagerungsbildung erzielt werden. Im Rahmen des Projektes wurde erstmalig insbesondere die Zusammensetzung biogener Kraftstoffkomponenten mit der Ablagerungsbildung in einem bestimmten Temperaturfenster korreliert.

Mit dem Aufbau eines Tiegelverdampfers für Ottokraftstoffe erweitert das OWI seine Kompetenz im Bereich Kraftstoffverdampfung und Ablagerungsbildung auf heißen Oberflächen. Die Übertragung der Prüfmethode Diesel-Tiegel auf Ottokraftstoffe wurde im Projekt erfolgreich vollzogen. Dabei ist festzuhalten, dass die Versuchsergebnisse der idealisierten Prüfmethode (Tiegelprüfstand) mit den Ergebnissen von realen Gesamtsystemen korrelieren. Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen werden in zukünftige Forschungsprojekte einfließen (FVV, IGF).

Darüber hinaus stellt die umfangreiche Modifikation der Heat Flux Methode eine wesentliche Verbesserung des Gesamtsystems dar. Mit dieser Methode ist es nach Abschluss des Projektes möglich, laminare Brenngeschwindigkeiten von technischen Brenn- und Kraftstoffen (Benzinfraktionen) zu bestimmen. Die hierfür notwendige Präzision der Brennstoffdosierung, Temperaturmessung und Regelung der Peripheriegeräte wurde erreicht. Es ist geplant, die Methode weiter für wissenschaftliche Untersuchungen zu verwenden und kontinuierlich weiter zu entwickeln. Die erzielten Verbesserungen am Heat Flux System werden im entsprechenden Forschungsnetzwerk (siehe www.heatfluxburner.org) diskutiert.

3.3 Erkenntnisse von Dritten

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Erkenntnisse von Dritten auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

3.4 Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit sind bereits Teile der erarbeiteten Erkenntnisse veröffentlich worden:

- S. Feldhoff, R.T.E.Hermanns: Recent improvements of the Heat Flux setup to determine laminar burning velocities of liquid fuels, Combura Symposium 2016 (Vortrag)
- S. Feldhoff, R.T.E.Hermanns: Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit mittels Heat-Flux-Methode, DGMK-Jahrestreffen der Analytiker 2016, 24. und 25. November 2016 in Hamburg

Weitere Veröffentlichungen sind geplant beispielsweise auf den Tagungen ECM 2017 - 8th European Combustion Meeting und TAE FUELS 2017.

Literaturverzeichnis

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Summary for Policymakers and Technical Summary,* 2012.

[2] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, *Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009,* Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.

[3] Schümann, Dr. rer. nat. Ulrike; Fink, Dr.-Ing. Christian; Crusius, Dr. rer. nat. Svetlana; Junk, Dipl.-Ing. René; Richter, Dr.-Ing. Beate; Lau, Dipl.-Chem. Kornelia; Streibel, Dr. rer. nat. Thorsten, *Änderungen von Kraftstoffeigenschaften unter extremen Randbedingungen – Ablagerungen in Common Rail Injektoren II (Kraftstoffveränderungen II),* Universität Rostock – Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik - Lehrstuhl für Kolbenmaschinen, 2014.

[4] Koch, Winfried; Müller, Dr. Martin; Seifert, Dr. Andrea; Eschner, Dr. Markus, *Schlussbericht zum Vorhaben: Entwicklung eines nichtmotorischen Injektorverkokungsprüfstands für alternative Kraftstoffe (ENIAK),* 2015.

[5] Technische Universität Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau - Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt - FG und Institut für Werkstoffkunde, *Schlussbericht zum Vorhaben: Korrosion in Biokraftstoffen,* 2015.

[6] S. Schlott, *Stand- und Zusatzheizungen,* Landsberg/Lech: verlag moderne industrie, 1997.

[7] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 590 – Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Dieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 590:2013 + AC:2014,* Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.

[8] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 228 – Unverbleite Ottokraftstoffe – Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 228:2012,* Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.

[9] Webasto Thermo & Comfort SE, *Einbauanweisung Thermo Top Evo,* 9021175L.

[10] Webasto Thermo & Comfort SE, *Einbauanweisung Thermo Top Z/E/C,* 1317098B.

[11] OWI Oel-Waerme-Institut GmbH; ASG mbH; ERC GmbH; AixCellSys GmbH [EVT GmbH]; J.Eberspächer GmbH; TI Automotive, *Abschlussbericht Verbundprojekt: GObio – Gezielte Optimierung von kraftstoffführenden Komponenten für biogene Kraftstoffe in mobilen Applikationen,* 2011.

[12] O. Altin und S. Eser, *CARBON DEPOSIT FORMATION FROM THERMAL STRESSING OF PETROLEUM FUELS,* Preprints of Papers- American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 2004.

[13] C. O'Brien, *Formation Mechanisms of Combustion Chamber Deposits,* Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2001.

[14] L. Stavinoha, S. Westbrook und L. Mclnnis, *Mechanism of Deposit Formation on fuel-wetted hot Metal Surfaces,* Belvoir Fuels and Lubricants Research Facility (SwRI), 1995.

[15] J. J. Liang, *Design and Development of an Experimental Apparatus to Study Jet Fuel Coking in Small Gas Turbine Fuel Nozzles,* Graduate Department of Aerospace Science and Engineering University of Toronto, 2013.

[16] Y. B. M. Arifin, *Diesel and Bio-diesel Fuel Deposits on a HotWall Surface,* Gunma University, Department of Mechanical System Engineering, 2009.

[17] G. Knothe, R. Dunn und M. Bagby, *Biodiesel: The use of vegetable oils and their derviatives as alternative diesel fuels,* Fuels and Chemicals from Biomass, National Center for Agricultural Utilization Research, U.S. Department of Agriculture, USA, 1997.

[18] R. Waytulonis, D. Kittelson und D. Zarling, *E20 Effects in Small Non-Road SI Engines - A literature and Information Search,* University of Minnesota Center for Diesel Research, 2008.

[19] Renewable Fuels Foundation, *Changes in Gasoline IV - The Auto Technician's Guide to Spark Ignition Engine Fuel Quality,* Renewable Fuels Foundation, 2009.

[20] H. Schwahn, U. Lutz und U. Kramer, *Deposit Formation of Flex Fuel Engines Operated on Ethanol and Gasoline Blends,* SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2010.

[21] J. Vilardo, D. Arters, K. Corkwell und C. Cerda de Groote, *A Comprehensive Examination of the Effect of Ethanol-Blended Gasoline on Intake Valve Deposits in Spark-Ignited Engines,* SAE Transactions Journal of Engines, 2007.

[22] M. Walter, *Engine Cleanliness in E85 Powered Flex-Fuel Vehicles,* goriva i maziva, 2015.

[23] S. S. Merola, C. Tornatore, L. Marchitto, G. Valentino und F. E. Corcione, *Experimental investigations of butanol-gasoline blends effects on the combustion process in a SI engine,* International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2012.

[24] A. C. F. Coriolano, M. T. B. Inagaki, R. C. O. B. Delgado, C. G. D. Peixoto und A. S. Araujo, *Kinetic Study on Decomposition of the Residues obtained from Distillation of Gasoline mixed with Ethanol for Flex-Fuel Technology in Brazil,* ISSN 1982-0593: Brazilian Journal of Petroleum and Gas, 2015.

[25] J. Fischer und K. Witt, *Sterylglycoside und acylierte Sterylglycoside in Pflanzenölen und Fettsäuremethylestern und ihre Auswirkungen auf die Filtrierbarkeit von Biodiesel,* Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V., 2011.

[26] H. Ackermann und L. Ebersbach, *DGMK-Forschungsbericht 749: Ablagerungsbildung in vormischenden Brennersystemen - Untersuchung zur Ursache und Minimierung durch Modifikation der Verdampfer-Oberfläche,* Hamburg: ISBN: 978-3-941721-60-9, 2015.

[27] S. Feldhoff, A. Awgustow, S. Kureti und T. Kuchling, *DGMK-Forschungsbericht 743: Hydriertes Pflanzenöl als Substitut für Heizöl EL schwefelarm,* Hamburg: ISBN: 978-3-941721-63-0, 2016.

[28] A. A. Konnov und I. V. Dyakov, *Measurement of propagation speeds in adiabatic flat and cellular premixed flames of C2H6+O2+CO2,* Combustion and Flame, Volume 136, Issue 3, 2004.

[29] V. R. Kishore, R. Muchahary, A. Ray und M. Ravi, *Adiabatic burning velocity of H2–O2 mixtures diluted with CO2/N2/Ar,* International Journal of Hydrogen Energy, Volume 34, Issue 19, 2009.

Anhang

Teilvorhaben 1

Bezeichnung des Teilvorhabens: „Einfluss von Vliesvariablen“

a) Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Rahmen des Teilvorhabens 1 soll die Koordinierung zwischen den beiden Verbundpartnern zur Gewährleistung eines reibungslosen Verlaufs des Vorhabens erfolgen. Hauptaufgaben sind die fachliche und terminliche Organisation des Projektablaufs, die Abstimmung mit dem Projektträger, die Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch gemeinsame Festlegung der Prüfbedingungen sowie der regelmäßige Austausch von Erfahrungen und Ergebnissen (Arbeitspaket 1).

Darüber hinaus soll in einer idealisierten Umgebung (Prüfstand) der Einfluss von Randbedingungen auf die Bildung von Ablagerungen in porösen Verdampfermedien (Vliese) empirisch untersucht werden. Als Randbedingungen sollen der Anteil und die Art von biogenen Komponenten im Kraftstoff, die Temperaturen im Bereich des Verdampfers, unterschiedliche Brennstoffmassenströme sowie die Eigenschaften und der Aufbau des Verdampfers getestet werden. Darüber hinaus sollen mittels Stoffanalytik die Zusammensetzung und mögliche Bildungsmechanismen der Ablagerungen aufgeklärt werden (Arbeitspaket 2).

b) Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Fachteam- und Projektleitung

Arbeitspaket 2: Empirische Datenerfassung – Einfluss von Vliesvariablen

c) Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Arbeitspaket 1: Fachteam- und Projektleitung

Im Rahmen eines Kick-Off Meetings vor Ort am OWI Aachen sowie in darauffolgenden telefonischen Abstimmungen werden die geplanten Arbeitspakete vorgestellt und technische Randbedingungen abgeglichen. Dabei werden speziell für die Arbeitspakete „Einfluss von Vliesvariablen“ (Verdampferprüfstand) und „Ablagerungs- und Sedimentbildung“ (Tiegelverdampfer) soweit möglich identische Randbedingungen gewählt, um eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Insbesondere folgende Punkte werden festgelegt:

- Als zu untersuchende Kraftstoffe kommen die gleichen Typen (Art und Anteil von biogenen Komponenten) zum Einsatz, die Basiskomponenten sind durch gemeinsame Beschaffung identisch; die untersuchten Typen spiegeln dabei typische aktuelle sowie potentielle zukünftige Feldkraftstoffe wieder.
- Die untersuchten Temperaturen sind, soweit technisch seitens des Prüfstandes erreichbar, in einem ähnlichen Fenster mit geeigneten Schrittweiten festgelegt und orientieren sich an den tatsächlichen, in realen Brennersystemen auftretenden Temperaturen.
- Als Tiegelmaterial kommt der Werkstoff 1.4841 zum Einsatz, was einem typischen Material von real eingesetzten Verdampfern in Heizgeräten entspricht sowie bei einem Großteil der Versuche am Verdampferprüfstand als Vliesmaterial eingesetzt wird.

Die Kraftstoffmatrix der Arbeitspakete „Messung laminarer Brenngeschwindigkeiten“ (HeatFlux-Prüfstand) und „Einfluss Schmierfähigkeit“ (Kolbenpumpenprüfstand) orientiert sich ebenfalls an den untersuchten Kraftstofftypen der Arbeitspakete betreffend den Verdampfer- und den Tiegelverdampferprüfstand.

Darüber hinaus wird der Gesamt-Fortschritt des Vorhabens regelmäßig überprüft und Ergebnisse, soweit bereits vorhanden, ausgetauscht. Im Laufe des Projekts notwendig werdende Änderungen in der Versuchsplanung werden zwischen beiden Versuchspartnern abgestimmt und nach Rücksprache mit der FNR umgesetzt. Die wichtigsten Änderungen im Vergleich zur Vorhabensbeschreibung umfassen folgende Punkte:

- TV 1, AP 2 Empirische Datenerfassung - Einfluss von Vliesvariablen: Bei der Einflussanalyse am Prüfstand werden aufgrund der Erkenntnisse aus den durchgeführten Vorversuchen geringe Änderungen in der Versuchsplanung sinnvoll, so werden z.B. nur fünf statt neun Stufen bei der Heißseitentemperatur zugunsten von fünf statt nur zwei Stufen bei der Rückseitentemperatur untersucht. Statt drei werden nur zwei unterschiedliche Brennstoffmassenströme getestet, die Kraftstoffmatrix erweitert sich dafür auf mehrere FAME-Typen statt nur einem. Nach Rücksprache mit Experten und entsprechenden Vorversuchen werden zudem für die Stoffanalytik die Auswahl der Methoden sowie die Anzahl der Proben angepasst.
- TV 2, AP a/b Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Benzin/Diesel-Blends: Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit des Tiegels auf die Ablagerungsbildung wird nicht gesondert untersucht, da in vorangegangenen Versuchen kein signifikanter Einfluss festgestellt werden konnte. Stattdessen wird der übrige Prüfungsumfang bzgl. Temperaturstufen und Kraftstoffmischungsverhältnisse ausgeweitet.
- TV 2, AP b Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Diesel-Blends: Der in der Vorhabensbeschreibung genannte Kraftstoff B7H3 (mineralölstämmiger Diesel mit 7% FAME und 3% HVO) wird zugunsten eines erweiterten Prüfumfangs bei anderen Kraftstoffmischungen nicht getestet. Gründe sind der zu diesem Zeitpunkt bereits ermittelte geringe Einfluss von HVO auf die Ablagerungsbildung, die geringe Marktrelevanz dieses Kraftstofftyps und die parallele Untersuchung des ähnlichen R33-Treibstoffs.
- TV 2, AP c Empirische Datenerfassung - Einfluss Pumpenvariablen: Nachdem in einem ersten Durchlauf B0, H100, B30 und H50 als Kraftstoffe untersucht wurden und unerwarteter Weise B30 als einziger Stoff zu Funktionsstörungen bei den Pumpen führte, soll in einem zusätzlichen zweiten Durchlauf der schädliche Einfluss des FAME-Anteils genauer erforscht werden. Dazu werden B7, B30 und B100 getestet, B7 dabei in zwei unterschiedlichen Alterungszuständen.
- TV 2, AP d Empirische Datenerfassung - Untersuchung laminarer Flammgeschwindigkeiten: Die Bezeichnung „Kraftstofftemperatur“ als untersuchte Einflussgröße in der Vorhabensbeschreibung ist nicht korrekt, untersucht wird der Einfluss der Gemischtemperatur.

In einem gemeinsamen Abschlussbericht werden die wesentlichen Ergebnisse dargestellt und Korrelationen zwischen den einzelnen Teilvorhaben aufgezeigt. Ein abschließendes Treffen zwischen Webasto und dem OWI zur Diskussion der Ergebnisse und Festlegung weiterer Schritte ist geplant.

Arbeitspaket 2: Empirische Datenerfassung – Einfluss von Vliesvariablen

Der vorgesehene Aufbau des Prüfstandes zur idealisierten Untersuchung der Ablagerungsbildung in porösen Verdampfern kann wie geplant umgesetzt werden. Die realitätsnahe Beheizung der flammseitigen Verdampferoberfläche unter inerten Bedingungen mit einem erhitzten Stickstoff-Strahl zeigt sich als umsetzbar und erfüllt die Anforderungen an den Prüfumfang bzgl. Temperaturen und Wärmeströmen. Der übrige Prüfaufbau mit beidseitiger Beheizung eines porösen Verdampfermediums kann erfolgreich erstellt und in Betrieb genommen werden, die Verwendbarkeit für verschiedene Verdampfertypen ist sichergestellt.

Die veranschlagte Projektlaufzeit erweist sich als ausreichend. Obwohl sich eine automatisierte Versuchsplanung nach der DOE-Methodik als nicht vorteilhaft erweist und deshalb nicht umgesetzt wird, können trotzdem alle notwendigen Versuche durchgeführt und die gegebenen Fragestellungen vollständig beantwortet werden. Bei der Analyse der Ablagerungen und kann durch gezielte Auswahl benötigter stoffanalytischer Untersuchungen und einer teilweisen Durchführung im Hause Webasto der Umfang der eingesetzten Methoden im Vergleich zur ursprünglichen Planung ausgeweitet und damit die Aussagekraft erhöht werden.

Für eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse sei auf Kapitel 2.1 verwiesen.

Teilvorhaben 2

Bezeichnung des Teilvorhabens: „Entwicklung von Prüfmethoden für unterschiedliche Biokraftstoffqualitäten zur Flammencharakterisierung sowie zu Verdampfungseigenschaften und deren Einfluss auf die Ablagerungsbildung“

a) Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Arbeitspaket a: Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Benzin-Blends

Im Arbeitspaket a soll ein idealer Tropfenverdampfer (siehe auch Arbeitspaket b) so umgerüstet werden, dass Benzinkraftstoffe anstatt Mitteldestillate untersucht werden können. Beim Einsatz von Benzinfraktionen sind entsprechend schärfere Sicherheitsmaßnahmen zu realisieren, weswegen dieser Prüfstand umfassend neu geplant und aufgebaut werden soll. Mit diesem Prüfstand kann die Ablagerungsbildungsneigung von Benzin und Benzin-Alkohol-Blends charakterisiert werden. Maßgebliche Parametervariationen stellen die einzustellenden Oberflächentemperaturen bis 400 °C dar.

Arbeitspaket b: Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Diesel-Blends

Im Arbeitspaket b „Ablagerungs- und Sedimentbildung“ werden Einflussvariablen für die Ablagerungsbildung von Mitteldestillaten identifiziert. Dies dient dazu, den Einfluss verschiedener Umgebungsbedingungen (insbesondere der Oberflächentemperatur) auf die Neigung zur Ablagerungsbildung von Mitteldestillaten zu charakterisieren. Hierfür wird der Tiegelverdampfungsprüfstand aus dem von der FNR geförderten GObio Projekt verwendet. Es werden der Einfluss biogener Komponenten wie Biodiesel (FAME) und hydrierter Pflanzenöle (HVO) sowie Unterschiede in der Fettsäureverteilung des Biodiesels jeweils bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Anhand der ermittelten Erkenntnisse werden spezifische Temperaturen in den Verdampfungs- und Verbrennungsarealen der spezifischen Heizgerätetechnologie angepasst und Empfehlungen für Kraftstoff-, Biokraftstoff- und Additiveinsatz generiert.

Arbeitspaket c: Empirische Datenerfassung - Einfluss Pumpenvariablen

Im Arbeitspaket c wird ein Hubkolbenpumpenprüfstand aufgebaut. Durch diesen Prüfstand kann geklärt werden, ob alternative beziehungsweise biogene Mitteldestillatkomponenten wie beispielsweise HVO, welches eine geringere Schmierfähigkeit gegenüber Dieselkraftstoffen aufweist, Einflüsse auf die Lebensdauer der Pumpen haben. Diese Kolbenpumpen werden in der Regel in Fahrzeugheizungen mit kleinen Leistungsbereichen eingesetzt. Die Auswirkungen der geringeren Schmierfähigkeit werden durch in regelmäßigen Abständen durchzuführende Durchflussmessungen sowie einer anschließenden optischen Beurteilung des Inneren der Pumpe untersucht.

Arbeitspaket d: Empirische Datenerfassung - Untersuchung laminarer Flammgeschwindigkeiten

Im Arbeitspaket d soll mittels der „Heatflux“-Methode die laminare Brenngeschwindigkeit verschiedener Benzin-Ethanol-Blends gemessen werden. Durch diese Untersuchungen können Rückschlüsse auf das Verhalten von verschiedenen Benzin-Blends in Heizungssystemen gezogen werden. Die laminare Brenngeschwindigkeit hängt unter anderem von der Temperatur und der Zusammensetzung des Brennstoff-Luft-Gemisches, sowie der chemischen Zusammensetzung des eingesetzten Kraftstoffes ab. So können Benzin-Blends mit Ethanol auf ihr Verhalten hin überprüft werden, ob sie ihre laminaren Flammgeschwindigkeiten ändern, wenn sie verschiedene (Ethanol-)Zumischraten oder auch höhere Wassergehalte aufweisen. Insbesondere ein erhöhter Wasseranteil reduziert die Brenngeschwindigkeit um mehrere Zentimeter pro Sekunde. Um den bestehenden „Heatflux“-Prüfstand am OWI für die geplanten Messungen von Brenngeschwindigkeiten flüssiger Kraftstoffe nutzen zu können, sind umfangreiche Modifikationen am Prüfstand notwendig.

b) Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket a: Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Benzin-Blends

Arbeitspaket b: Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Diesel-Blends

Arbeitspaket c: Empirische Datenerfassung - Einfluss Pumpenvariablen

Arbeitspaket d: Empirische Datenerfassung - Untersuchung laminarer Flammgeschwindigkeiten

c) Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Arbeitspaket a: Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Benzin-Blends

Der Prüfstand zur Bewertung der Ablagerungsbildung von Ottokraftstoffblends konnte wie geplant aufgebaut und betrieben werden. Die erzielten Ergebnisse decken sich mit den Erwartungen. Generell werden bei niedrigeren Tiegeltemperaturen größere Ablagerungsmassen gemessen. Zudem beeinflusst die Zusammensetzung der Kraftstoffe die Ablagerungsbildung. Je größer der Alkoholanteil im Blend ist, desto geringe fallen die Ablagerungsmengen aus.

Innerhalb des Siedebereichs des Referenz-Benzins (Tiegeltemperaturen um 200 °C) sind Ablagerungen als klebrig zu bezeichnen, während Ablagerungen bei höheren Temperaturen trocken und pulverartig sind (Verkokung).

Die Ablagerungsmengen sind insgesamt gering. Bei Tiegeltemperaturen über 250 °C sind die Ablagerungsmengen vernachlässigbar.

Für eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse sei auf Kapitel 2.2 verwiesen.

Arbeitspaket b: Empirische Datenerfassung - Ablagerungs- und Sedimentbildung von Diesel-Blends

Der bereits aus einem früheren Projekt verfügbare Prüfstand zur Bewertung der Ablagerungsbildung von Dieselkraftstoffen konnte wie geplant betrieben werden. Auch hier bestätigten sich die Erwartungen. Niedrige Tiegeltemperaturen sowie höhere FAME-Anteile begünstigen die Ablagerungsbildung. Das allgemeine Niveau der Ablagerungsmengen ist höher verglichen mit Arbeitspaket a (Ottokraftstoffe).

Aufgrund ihrer leicht unterschiedlichen chemischen Struktur (Kettenlänge, Sättigungsgrad) haben unterschiedliche FAME-Blendkomponenten (RME, SME, PME) einen mehr oder weniger starken Einfluss auf die Ablagerungsbildung. Von den drei getesteten FAME wird die Ablagerungsbildung durch SME am stärksten beeinflusst.

Bei Einsatz von HVO als Blendkomponente zeigt sich keine Veränderung der Ablagerungsneigung gegenüber reinem Dieselkraftstoff.

Für marktgängige Kraftstoffe mit maximal 7 vol.-% FAME können hinsichtlich der Ablagerungsbildung auf heißen Oberflächen auf Basis der in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse Temperaturbereiche oberhalb 325 °C empfohlen werden. Hier lagen die bestimmten Ablagerungsmengen stets unterhalb von 10 mg/100 ml Kraftstoff.

Für eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse sei auf Kapitel 2.3 verwiesen.

Arbeitspaket c: Empirische Datenerfassung - Einfluss Pumpenvariablen

Der Prüfstand zur Untersuchung des Einflusses der Schmierfähigkeit des Kraftstoffs auf die Lebensdauer der Hubkolbenpumpen (Verschleiß) wurde planmäßig aufgebaut. Es wurden 12 separate Stränge aufgebaut und jeweils drei Pumpen mit demselben Kraftstoff getestet. So konnte der Einfluss von vier Kraftstoffen simultan geprüft werden. Es wurden zwei Prüfläufe durchgeführt und somit insgesamt 24 Pumpen in die Versuchsdurchführung einbezogen.

Im Allgemeinen ist festzuhalten, dass Korrosionserscheinungen lediglich bei FAME-haltigen Kraftstoffmischungen beobachtet werden konnten. Bei HVO-haltigen Kraftstoffen konnten keine negativen Effekte wie bspw. erhöhter Verschleiß festgestellt werden.

Signifikante Ablagerungsmengen im Kraftstoffsieb konnten beim Kraftstoffgemisch H50 gefunden werden. Alle drei entsprechenden Pumpen wiesen eine starke Verschmutzung der Filter auf. Dennoch kam es in der hier durchgeführten Versuchszeit nicht zu einer Durchflussabnahme. Eine vergleichbare Phänomenologie ist aus der Literatur bekannt, jedoch derzeit nicht im Detail aufgeklärt. Hierzu werden weitergehende Untersuchungen empfohlen.

Für eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse sei auf Kapitel 2.4 verwiesen.

Arbeitspaket d: Empirische Datenerfassung - Untersuchung laminarer Flammgeschwindigkeiten

Im Fokus dieses Arbeitspakets lag die Optimierung des Heatflux-Prüfstandes hinsichtlich der Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit von Benzinfraktionen sowie Benzin-Alkohol-Gemischen. Die dafür notwendigen umfangreichen Modifikationen am Prüfstand konnten wie geplant durchgeführt werden.

Die Gesamtheit der Ergebnisse entsprach den Erwartungen. Es zeigt sich generell eine starke Abhängigkeit vom Äquivalenzverhältnis Φ für alle untersuchten Brennstoffe.

Im technisch relevanten Bereich $\Phi \leq 0{,}9$ (magere Verbrennung) ist die Streuung der Brenngeschwindigkeiten der untersuchten Brennstoffe insgesamt betrachtet als gering zu bezeichnen. Das bedeutet, dass technische Systeme mit entsprechendem Auslegungspunkt hinsichtlich der Brennraumgestaltung unempfindlicher auf Änderungen der Kraftstoffzusammensetzung reagieren.

Die Ergebnisse zu Alkohol-Wasser-Mischungen müssen kritisch hinterfragt werden. Hier wurden Diskrepanzen zu Literaturwerten offensichtlich, deren Klärung zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nicht ursächlich geklärt sind.

Für eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse sei auf Kapitel 2.5 verwiesen.

Kraftstoffanalysen

Im Folgenden die Eingangs-Analysen der im Projekt verwendeten Basis-Kraftstoffe.

Prüfparameter	Prüfmethode		Prüfergebnis	Einheit
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185		749,4	kg/m3
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20846		7,2	mg/kg
Oxidationsstabilität	DIN EN ISO 7536	(a)	>360	min.
Abdampfrückstand	DIN EN ISO 6246		<4	mg/100ml
Korrosionswirkung auf Kupfer	DIN EN ISO 2160		1	Korr.Grad
Benzolgehalt	DIN EN ISO 22854		0,94	% (V/V)
Aromatengehalt			32,54	% (V/V)
Olefingehalt			9,06	% (V/V)
Ethanolgehalt			0,37	% (V/V)
Sauerstoffhaltige Verbdg.			12,31	% (V/V)
Sauerstoffgehalt			2,03	% (m/m)
Kohlenstoffgehalt			84,86	% (m/m)
Wasserstoffgehalt			13,11	% (m/m)
Stickstoffgehalt	DIN 51444	(a)	2,4	mg/kg
Dampfdruck DVPE	DIN EN 13016-1		59,0	kPa
Destillationsbeginn	DIN EN ISO 3405		37,4	°C
Verdampfte Menge bei 70 °C			26,6	% (V/V)
Verdampfte Menge bei 100 °C			57,0	% (V/V)
Verdampfte Menge bei 150 °C			95,2	% (V/V)
Siedeendpunkt			175,3	°C
Destillationsrückstand			0,8	% (V/V)

Abbildung 94: Analysedaten Ottokraftstoff (E0), Verwendung in Teilvorhaben 1

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Einheit
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20846	3,9	mg/kg
Oxidationsstabilität	DIN EN ISO 7536	>360	min.
Abdampfrückstand	DIN EN ISO 6246	<4	mg/100ml
Korrosionswirkung auf Kupfer	DIN EN ISO 2160	1	Korr.Grad
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	744,8	kg/m³
Benzolgehalt	DIN EN ISO 22854	0,73	% (V/V)
Aromatengehalt		28,07	% (V/V)
Olefingehalt		8,23	% (V/V)
Gesamt-Sauerstoffgehalt		2,14	% (m/m)
Gesättigte Kohlenwasserstoffe		51,57	% (V/V)
Sauerstoffhaltige Verbindungen		12,14	% (V/V)
Methanol		<0,01	% (V/V)
Ethanol		0,34	% (V/V)
Isopropanol		<0,01	% (V/V)
Isobutanol		<0,01	% (V/V)
tert-Butanol		0,11	% (V/V)
Ether (≥ 5 C-Atome)		11,69	% (V/V)
Höhere Alkohole (C3-C5)		0,11	% (V/V)
Ethanol u. höhere Alkohole		0,45	% (V/V)
andere O-stoffhaltige Verbdg.		<0,01	% (V/V)
Kohlenstoffgehalt		84,39	% (m/m)
Wasserstoffgehalt		13,47	% (m/m)
Sauerstoffgehalt		2,14	% (m/m)
Heizwert (Hu,p)		42,57	MJ/Kg
Destillationsbeginn	DIN EN ISO 3405	35,1	°C
Verdampfte Menge bei 70 °C		25,9	% (V/V)
Verdampfte Menge bei 100 °C		52,9	% (V/V)
Verdampfte Menge bei 150 °C		91,3	% (V/V)
Siedeendpunkt		186,5	°C
Destillationsrückstand		0,8	% (V/V)
Stickstoffgehalt	DIN 51444	10,7	mg/kg

Abbildung 95: Analysedaten fossiler Ottokraftstoff (E0), Verwendung in Teilvorhaben 2

Prüfergebnisse

Eigenschaften	Prüfverfahren	Einheiten	Werte
Aussehen	visuell		klar
Dichte bei 15 °C	DIN EN ISO 12185	kg/m³	828,5
Farbzahl	DIN ISO 2049		0,5
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	mg/kg	48
Flammpunkt	DIN EN ISO 2719	°C	67,0
Kin. Viskosität bei 40 °C	DIN EN ISO 3104	mm²/s	2,663
Destillation	DIN EN ISO 3405		
bis 250 °C		Vol.-%	40,1
bis 350 °C		Vol.-%	95,2
bis 95 Vol.-%		°C	349,0
Siedeende		°C	355,4
Cloudpoint	DIN EN 23015	°C	-7
CFPP	DIN EN 116	°C	-32
Asche	DIN EN ISO 6245	Mass.-%	< 0,01
Cetanindex	DIN EN ISO 4264		54,0
Cetanzahl	DIN 51773		54,0
Schmierfähigkeit (HFRR)	DIN EN ISO 12156-1	µm	348
*Elektrische Leitfähigkeit bei 21 °C	DIN 51412-2	pS/m	91
Koksrückstand nach Conradson (von 10 % Dest.-Rückstand)	DIN EN ISO 10370	Mass.-%	0,03
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	mg/kg	6,6
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	DIN EN 12916	Mass-%	1,9
FAME-Gehalt	DIN EN 14078	Vol.-%	< 0,05
Kupferkorrosion	DIN EN ISO 2160	Korrosionsgrad	1
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662	mg/kg	6
Oxidationsstabilität	DIN EN ISO 12205	g/m³	2
Thermische Stabilität (16 h bei 105 °C)	DIN 51371	mg/kg	5

*nicht akkreditiert

Kommentar

Die Probe entspricht in den untersuchten Eigenschaften den Anforderungen der DIN EN 590, Winterqualität.

Abbildung 96: Analysedaten fossiler Dieselkraftstoff (DK, B0), Verwendung in beiden Teilvorhaben

Analytik	Methode	Einheiten	Min	Max	RME
Estergehalt	DIN EN 14103:2003 (2011)	% (m/m)	96,5		>99
Dichte 15°C	DIN EN ISO 12185	kg/m^3	860	900	883
Viskosität 40°C	EN ISO 3104	mm^2/s	3,5	5	4,44
Flammpunkt	DIN EN ISO 3679	°C	101		182
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20846	mg/kg		10	3,5
Cetanzahl	EN ISO 5165		51		56,7
Sulfatasche	ISO 3987	% (m/m)		0,02	<0,01
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	mg/kg		500	80
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662:1998	mg/kg		24	15
Kupfer-Korrosion	DIN EN ISO 2160			1	1
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112	h	8		9,4
Säurezahl	DIN EN 14104	mg KOH/g		0,5	0,46
Iodzahl	DIN EN 14111	g Iod/100g		120	113
Linolensäureester	DIN EN 14103	% (m/m)		12	9,8
Ester mit 4 und Mehr =	EN 15779	% (m/m)		1	0,1
Methanol	DIN EN 14110	% (m/m)		0,2	0,02
Monoglyceride	DIN EN 14105	% (m/m)		0,7	0,5
Diglyceride	DIN EN 14105	% (m/m)		0,2	0,07
Triglyceride	DIN EN 14105	% (m/m)		0,2	0,01
Freies Glycerin	DIN EN 14105	% (m/m)		0,02	0,007
Gesamtglycerin	DIN EN 14105	% (m/m)		0,25	0,14
Alkaligehalt	DIN EN 14538	mg/kg		5	<2
Erdalkaligehalt	DIN EN 14538	mg/kg		5	<2
Phosphorgehalt	DIN EN 14107	mg/kg		4	<4
Cloud Point	DIN EN 23015	°C		-3	-6
CFPP	DIN EN 116	°C		-12	-15
Pour Point	DIN ISO 3016	°C	-18	-9	-11

Abbildung 97: Analysedaten Rapsölmethylester (RME), Verwendung in beiden Teilvorhaben

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Grenzwerte DIN EN 14214:2012-11 min.	max.	Einheit
Estergehalt	DIN EN 14103:2011	>99	96,5	-	% (m/m)
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	884,6	860	900	kg/m³
Kin. Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	4,186	3,50	5,00	mm²/s
Flammpunkt	DIN EN ISO 3679	181,5	101	-	°C
Cetanzahl (ACZ)	DIN EN 15195	54,4	51,0	-	-
Korrosionswirkung auf Kupfer	DIN EN ISO 2160	1	1		Korr.Grad
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112	3,3	8,0	-	h
Säurezahl	DIN EN 14104	0,099	-	0,50	mg KOH/g
Iodzahl	DIN EN 16300	125	-	120	g Iod/100g
Linolensäure-Gehalt	DIN EN 14103:2011	6,1	-	12,0	% (m/m)
PUFA	DIN EN 15779/A1	<0,6	-	1,00	% (m/m)
Methanolgehalt	DIN EN 14110	0,01	-	0,20	% (m/m)
Gehalt an freiem Glycerin	DIN EN 14105:2011	0,001		0,02	% (m/m)
Monoglycerid-Gehalt		0,55		0,70	% (m/m)
Diglycerid-Gehalt		0,16		0,20	% (m/m)
Triglycerid-Gehalt		0,04		0,20	% (m/m)
Gesamtglycerin-Gehalt		0,17		0,25	% (m/m)
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	499	-	500	mg/kg
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662:1998	15	-	24	mg/kg
Sulfatasche (775 °C)	ISO 3987	<0,01	-	0,02	% (m/m)
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	<5 (<1)	-	10,0	mg/kg
Alkaligehalt (Na+K)	DIN EN 14538	<1	-	5,0	mg/kg
Erdalkaligehalt (Ca+Mg)		<1	-	5,0	mg/kg
Phosphorgehalt	DIN EN 14107	<4	-	4,0	mg/kg
CFPP	DIN EN 116	-5	-	-*	°C
Cloudpoint	DIN EN 23015	0	-	-*	°C

Abbildung 98: Analysedaten Sojamethylester (SME), Verwendung in beiden Teilvorhaben

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Grenzwerte DIN EN 14214:2012-11 min.	max.	Einheit
Estergehalt	DIN EN 14103	>99	96,5	-	% (m/m)
Dichte bei 15 °C	DIN EN ISO 12185	874,8	860	900	kg/m³
Kin. Viskosität bei 40 °C	DIN EN ISO 3104	4,452	3,5	5,0	mm²/s
Flammpunkt	DIN EN ISO 2719	154,5	101	-	°C
Cetanzahl (ACZ)	DIN EN 15195	61,7	51,0	-	-
Kupferkorrosion	DIN EN ISO 2160	1	1		Korr. Grad
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112	13,2	8,0	-	h
Säurezahl	DIN EN 14104	0,361	-	0,50	mg KOH/g
Iodzahl	DIN EN 14111	54	-	120	g Iod/100 g
Linolensäure-ME-Gehalt	DIN EN 14103	<1 (0,4)	-	12,0	% (m/m)
Methylester ≥ 4 Doppelbindungen	DIN EN 15779	<0,6	-	1,00	% (m/m)
Methanolgehalt	DIN EN 14110	0,03	-	0,20	% (m/m)
Gehalt an freiem Glycerin	DIN EN 14105	<0,01	-	0,02	% (m/m)
Monoglycerid-Gehalt		0,22	-	0,70	% (m/m)
Diglycerid-Gehalt		0,02	-	0,20	% (m/m)
Triglycerid-Gehalt		0,11	-	0,20	% (m/m)
Gehalt an Gesamtglycerin		0,07	-	0,25	% (m/m)
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	279	-	500	mg/kg
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662:1998	8	-	24	mg/kg
Asche-Gehalt (Sulfatasche)	ISO 3987	<0,01	-	0,02	% (m/m)
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	<5 (<1)	-	10,0	mg/kg
Alkaligehalt (Na + K)	DIN EN 14538	<1	-	5,0	mg/kg
Erdalkaligehalt (Ca + Mg)		<1	-	5,0	mg/kg
Phosphorgehalt	DIN EN 14107	<4 (<0,5)	-	4,0	mg/kg
CFPP	DIN EN 116	+12	-	*	°C
Cloudpoint	DIN EN 23015	+11	-	-	°C

Abbildung 99: Analysedaten Palmölmethylester (PME), Verwendung in beiden Teilvorhaben

Parameter	Method	Result	Specification prEN 15940:2014-11 min.	max.	Unit
Cetane number (DCN)	DIN EN 15195	72,9	70,0	-	-
Density (15 °C)	DIN EN ISO 12185	779,6	765,0	800,0	kg/m3
Flash point	DIN EN ISO 2719	84,0	>55	-	°C
Kin. viscosity (40 °C)	DIN EN ISO 3104	2,962	2,00	4,50	mm2/s
% (V/V) recovery at 250 °C	DIN EN ISO 3405	2,7	-	<65	% (V/V)
% (V/V) recovery at 350 °C		>98	85	-	% (V/V)
95 % (V/V) recovery		294,8	-	360	°C
HFRR (Lubricity)	DIN EN ISO 12156-1	442	-	460	µm
Fatty acid methylester content	DIN EN 14078	<0,1	-	7,0	% (V/V)
Total aromatic content	DIN EN 12916	0,2	-	1,0	% (m/m)
Sulfur content	DIN EN ISO 20884	<5 (<1)	-	5,0	mg/kg
Carbon residue (10 % Dist.)	DIN EN ISO 10370	<0,10	-	0,30	% (m/m)
Ash content (775 °C)	DIN EN ISO 6245	<0,005	-	0,01	% (m/m)
Water content	DIN EN ISO 12937	13	-	200	mg/kg
Total contamination	DIN EN 12662	<1	-	24	mg/kg
Copper strip corrosion	DIN EN ISO 2160	1	1		Korr.Grad
Oxidation stability	DIN EN ISO 12205	<1	-	25	g/m3
filterable insolubles		<1	-	-	g/m3
adherent insolubles		<1	-	-	g/m3
CFPP	DIN EN 116	- 30	-	*	°C

Abbildung 100: Analysedaten hydriertes Pflanzenöl (HVO), Verwendung in beiden Teilvorhaben

Berichtsblatt - Kurzfassung des Vorhabens

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Webasto Thermo & Comfort SE	22402815
OWI Oel-Waerme-Institut GmbH	22402915

Thema:

Differenzierung unterschiedlicher Brennstoffqualitäten im Hinblick auf die Ablagerungsbildung

Teilvorhaben 1: Einfluss von Vliesvariablen

Teilvorhaben 2: Entwicklung von Prüfmethoden für unterschiedliche Biokraftstoffqualitäten zur Flammencharakterisierung sowie zu Verdampfungseigenschaften und deren Einfluss auf die Ablagerungsbildung

Laufzeit des Vorhabens:

01.11.2015 bis 31.10.2016

Projektbeschreibung:

In diesem Projekt wird der Einfluss biogener Brennstoffe auf die Funktion von Fahrzeugstandheizungen untersucht. Im Fokus steht die Neigung der Brennstoffe zur Bildung von Ablagerungen und Rückständen. Der Untersuchungsumfang umfasst sowohl Dieselkraftstoffblends mit Beimischungen von Fettsäuremethylestern (FAME) und vollständig hydrierten Pflanzenölen (HVO) als auch Ottokraftstoffe mit Zusatz von Ethanol, Methanol oder Butanol.

Zur Bewertung werden zum einen idealisierte Versuche mit einem Prüfstand zur Einzeltropfenverdampfung auf heißen Oberflächen (Tiegelverdampfer) durchgeführt. Hierbei können die prinzipiellen chemisch-physikalischen Vorgänge bei der Entstehung von Ablagerungen optimal beobachtet werden. Zum anderen soll mit einem realitätsnahen Prüfaufbau die Ablagerungsbildung bei kontinuierlicher Verdampfung in einem porösen Medium (Verdampfer-Vlies) untersucht werden, was dem Prinzip der Brennstoffaufbereitung bei typischen Fahrzeugstandheizungen entspricht. Als Randbedingungen werden z.B. die Temperatur, die Brennstoffzusammensetzung oder die Eigenschaften des porösen Mediums variiert. Ziel ist die bestmögliche Auslegung von Verdampferbrennern, besonders für zukünftige, höhere Zumischquoten von Bio-Kraftstoffen im nationalen und internationalen Markt.

Speziell für Diesel-Kraftstoffe wird ferner der Einfluss von biogenen Bestandteilen auf die Funktion der bei mobilen Heizgeräten häufig eingesetzten Hubkolben-Dosierpumpen in entsprechenden Dauerlauf-Tests untersucht. Damit soll die Funktionssicherheit dieser Fördereinrichtung auch bei kritischen Kraftstoffen bzgl. Ablagerungsbildung und Bauteilverschleiß nachgewiesen werden.

Zudem wird an einem entsprechenden Prüfstand (Heatflux-Methode) die Beeinflussung der laminaren Brenngeschwindigkeit durch Alkohol-Beimischungen, wie Ethanol oder Butanol in Ottokraftstoffen bestimmt. Diese Ergebnisse sind ebenfalls wesentlich für die Auslegung der Brennraumgeometrie für entsprechende Brennstoffe, unter anderem, um einen minimalen Schadstoffausstoß sicherzustellen.

Projektergebnisse:

Die Prüfstände zur Untersuchung der Ablagerungsbildung können wie beabsichtigt in Betrieb genommen werden, alle geplanten Versuche werden durchgeführt. Als wesentliche Einflussgrößen auf die Ablagerungsbildung werden die Temperaturen im Bereich des Verdampfers sowie die Brennstoffzusammensetzung identifiziert. Insbesondere durch eine Erhöhung der Verdampfertemperatur kann die Rückstandsbildung in vielen Fällen deutlich vermindert werden. Während für die Beimischung von Alkoholen zum Otto-Kraftstoff eine Verringerung der Ablagerungsbildung belegbar ist, führen Fettsäuremethylester im Diesel-Kraftstoff zu einem signifikanten Anstieg der Rückstände. Die Art des für die Herstellung eingesetzten Pflanzenöls hat dabei großen Einfluss auf die Ablagerungsmenge. Hydrierte Pflanzenöle zeigen sich als weitestgehend neutral bzgl. ihrer Ablagerungseigenschaften im Vergleich zu fossilem Diesel-Kraftstoff. Die Parameter des porösen Mediums spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Die getesteten Hubkolben-Dosierpumpen zeigen sich als tolerant gegenüber verschiedenen biogenen Dieselkraftstoff-Substituten, reagieren aber mit Funktionseinschränkungen bei starker Alterung von FAME-haltigen Kraftstoffen.

Durch Optimierungen am Heat-Flux-Prüfstand kann die Zuverlässigkeit der Ergebnisse weiter gesteigert werden und durch entsprechende Versuchsreihen eine breite Datenbasis bzgl. der laminaren Brenngeschwindigkeiten von Ottokraftstoff-Alkohol-Mischungen geschaffen werden.

Short Project Description

Beneficiary:	Project number:
Webasto Thermo & Comfort SE	22402815
OWI Oel-Waerme-Institut GmbH	22402915

Project title:

Differentiation of varying fuel qualities regarding the formation of deposits

Project part 1: Influence of properties of porous media

Project part 2: Development of test procedures regarding different bio fuel qualities for flame characterization as well as determination of the evaporation properties and their influence on the formation of deposits

Project :

01.11.2015 to 31.10.2016

Project objective:

In this project the influence of biogenic fuels on the operation of parking heaters is investigated. The focus is on the affinity of the fuels for the formation of deposits and residues. The study includes diesel fuel blends with fatty acid methyl esters (FAME) and fully hydrogenated vegetable oils (HVO) as well as gasoline fuels containing ethanol, methanol or butanol.

For the evaluation on the one hand idealized experiments on a test bench for single-drop-evaporation on a hot surface (pot evaporator) are carried out. In this case the fundamental physico-chemical processes can be observed. On the other hand a test bench close to reality is used to study the build-up of deposits during continuous evaporation within porous media (evaporator fleece), which correlates with the fuel preparation of typical parking heaters. As parameters for example the temperature, the fuel composition or the properties of the porous medium are varied. The aim is to achieve the best possible design for evaporator burners, especially for higher biogenic contents in future fuels in national and international markets.

In addition particular for diesel fuels the influence of biogenic contents on the operation of piston dosing pumps, which are most common in use with parking heaters, is evaluated using appropriate endurance tests. With that the operational reliability of these devices in use with critical fuels regarding the formation of deposits and the wear of components is to be verified.

Furthermore the interaction between alcoholic admixtures to gasoline, like ethanol or butanol, and the laminar burning velocity is investigated on a suitable test bench (heatflux method). These results are as well essential for the design of the burner, among other things to ensure minimal exhaust gas emissions.

Project results:

The test benches for the investigation of the build-up of deposits can be put into operation as projected. All planned tests are realized. As most important influencing parameters the temperature of the evaporator and the fuel composition are identified. In particular an increase of the temperature leads in most cases to a reduction of deposits. While alcoholic admixtures to gasoline result in a decreasing deposit formation, the addition of fatty acid methyl esters leads to significantly higher deposits. In this case the feedstock of the biodiesel has an important influence on the amount of deposits. Hydrogenated vegetable oils appear to be almost neutral regarding their deposit properties compared to fossil diesel fuel. The parameters of the evaporator play no more than a minor role.

The tested piston dosing pumps are qualified to be tolerant towards different biogenic diesel fuel substitutes, but respond with limited functionality to intensely aged FAME-containing fuels.

With optimizations of the heat-flux testing bench the reliability of the results can be increased and with a series of appropriate tests a broad data base regarding the laminar burning velocity of gasoline-alcohol-mixtures can be created.