

# Schlussbericht vom 31.01.2024

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21192 N

## Thema

Integrales Mehrstoffbrennersystem zur Erzeugung industrieller Prozesswärme aus flüssigen und gasförmigen Ersatzbrennstoffen – Integration eines Vorverdampfungskonzeptes für flüssige Biobrenn-, Rest- und Abfallstoffe (InteBRA)

## Berichtszeitraum

01.05.2020 bis 31.07.2023

## Forschungsvereinigung

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

## Forschungseinrichtung(en)

FSt. 1: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)

FSt. 2: OWI Science for Fuels gGmbH (OWI)

Gefördert durch:

# Gliederung

---

Thema .....	1
Berichtszeitraum .....	1
Forschungsvereinigung .....	1
Forschungseinrichtung(en) .....	1
1 Einleitung .....	4
2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Aufgabenstellung .....	5
2.1 Anlass für das Vorhaben und Ausgangssituation .....	5
2.2 Stand der Forschung und Entwicklung .....	8
2.2.1 Verbrennung von Pyrolyseölen, Rückstandsölen und Reststoffen .....	8
2.2.2 Mehrstoffverbrennung regenerativer Brennstoffe .....	10
3 Forschungsziel / Forschungsergebnisse / Lösungsweg .....	12
3.1 Forschungsziel .....	12
3.2 Forschungsergebnisse .....	12
3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse .....	12
3.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse .....	13
3.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels .....	13
4 Brennstoffcharakterisierung und Voruntersuchungen .....	17
4.1 Brennstoffauswahl .....	17
4.1.1 Flüssige Brennstoffe .....	17
4.1.2 Gasförmige Brennstoffe .....	19
4.2 Experimentelle Charakterisierung der Flüssigbrennstoffe .....	20
4.2.1 Thermogravimetrische Analyse (TGA) .....	20
4.2.2 Dichte und Viskosität .....	27
4.2.3 Untersuchung der Partikelbildung aus der Verbrennung .....	29
4.3 Verbrennung von wasserhaltigen schwachkalorischen Brenngasen .....	32
5 Entwicklung eines Brenners mit integriertem Verdampfungskonzept für flüssige Brennstoffe .....	37
5.1 Auswahl eines Brennerkonzeptes .....	37
5.1.1 Brennerkonzepte .....	37
5.1.2 Untersuchung mittels numerischer Berechnungen für gasförmige Brennstoffe .....	38
5.1.3 Untersuchung mittels numerischer Berechnungen für flüssige Brennstoffe .....	42
5.2 Brenner für 100 kW thermische Leistung .....	44
5.2.1 Brennerkonstruktion .....	44
5.2.2 Numerische Berechnungen für die finale Geometrie .....	45
6 Erprobung des Brenners in einer Kesselanwendung .....	48
6.1 Versuchsanordnung und -durchführung .....	48
6.2 Messtechnische Charakterisierung .....	49
6.2.1 Reaktionszone .....	49
6.2.2 Abgaszusammensetzung .....	51
6.2.3 Druck- und Temperaturverhalten .....	53
6.2.4 Wärmeaustrag aus dem Kessel .....	54
6.2.5 Partikelgrößenverteilung im Betrieb mit Pyrolyseöl .....	54
6.3 Betriebserfahrung .....	56

7	Technische Analyse und ökologische Bewertung des Konzeptes im Hinblick auf mögliche Einsatzgebiete	58
8	Ausblick.....	60
9	Projektplan .....	61
10	Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen .....	63
11	Nutzen der Forschungsergebnisse .....	64
11.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen .....	65
11.2	Wirtschaftlicher Nutzen für KMU .....	66
11.3	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten .....	67
12	Veröffentlichungen.....	69
	Danksagung.....	70
	Abbildungsverzeichnis.....	71
	Tabellenverzeichnis.....	74
	Literaturverzeichnis.....	75

## 1 Einleitung

Abgesehen von elektrisch beheizten Industrieöfen, erfolgt die Bereitstellung von Prozesswärme in der Regel durch die Verbrennung von Erdgas. Der Einsatz gasförmiger und flüssiger alternativer Brennstoffe ist bislang noch die Ausnahme und im Wesentlichen auf den Einsatz biogener Brennstoffe der 1. Generation beschränkt. Für die Steigerung der Effizienz industrieller Prozessketten durch die Senkung der Energiekosten und die Verbesserung der ökologischen Bilanz, wird die Nutzung von Ersatzbrennstoffen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Zur energetischen Verwertung kommen biogene Brennstoffe der 2. und 3. Generation (Pyrolyseöle etc.), flüssige Abfallprodukte aus chemischen Herstellungsverfahren, aber auch schwachkalorische Prozessgase (Synthesegase etc.) in Frage. In deren energetischer Verwertung besteht insbesondere für KMU die Möglichkeit Energiekosten zu senken und CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie kostenintensive Entsorgungspfade einzusparen.

Für den Einsatz dieser Brennstoffe bedarf es jedoch der Entwicklung geeigneter Verbrennungstechnologien. Die Verbrennung schwachkalorischer und stark kontaminierter Brennstoffe, bspw. mit erheblichen Wassergehalten, oder Anteilen an brennstoffgebundenem Stickstoff, stellt im Hinblick auf die Stabilität und Schadstoffbildung eine enorme Herausforderung dar. Bei der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen können Partikelemissionen eine Rolle spielen. Zur Erreichung hoher Brennstoffflexibilität müssen diese zudem unabhängig von deren viskoser Beschaffenheit zuverlässig in den Brennraum eingebracht werden können. Ein effizienter Weg kann eine Vorverdampfung durch rekuperierte Prozesswärme darstellen. Die Vorverdampfung kann auch die effektive Mischung mit dem Oxidator begünstigen und eine Verbrennung ohne Stützflamme ermöglichen. Projektziel im Rahmen von „InteBRA“ ist die Entwicklung eines Mehrstoffbrenner mit einem integrierten, rekuperativen Vorverdampfungskonzept für eine kombinierte, schadstoffarme Verbrennung von flüssigen und gasförmigen Ersatzbrennstoffen.

Bei der Entwicklung des Bio-Mehrstoffbrenner wurden abgestimmte experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen eingesetzt, die Arbeiten wurden unter den Projektpartner wie folgt aufgeteilt:

Die Untersuchungen zur Vorverdampfung flüssiger Brennstoffe wurden an der OWI Science for Fuels gGmbH (OWI) durchgeführt. Die Auslegung des Brennermusters erfolgte arbeitsteilig am OWI für die Verbrennung der Flüssigbrennstoffe sowie am Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI) für die Verbrennung der gasförmigen Brennstoffe. Die anwendungsnahen Untersuchungen des Brennermusters erfolgten am GWI. Die erreichten Ergebnisse zeigen, dass mit dem vorgestellten Brennerkonzept prinzipiell eine stabile Verbrennung der gasförmigen und vorverdampften flüssigen regenerativen Brennstoffe der 2. und 3. Generation bei geringem Schadstoffausstoß möglich ist.

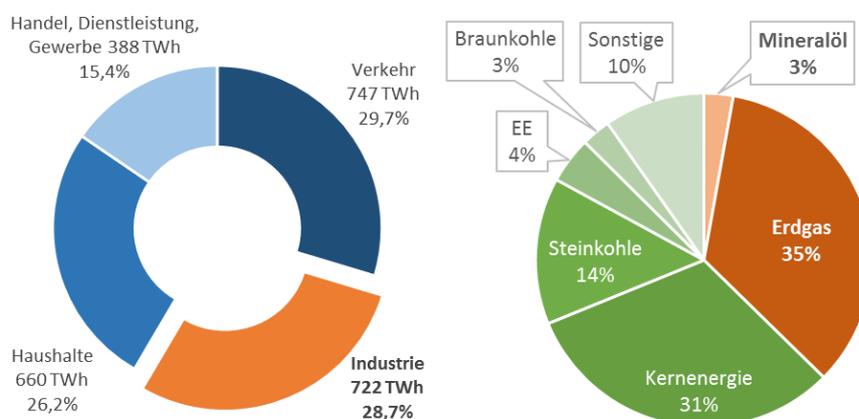
Aus Sicht der Forschungsstellen und des projektbegleitenden Ausschusses konnten die im Antrag formulierten wissenschaftlich-technischen Projektziele erreicht werden.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde vollständig erreicht.**

## 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Aufgabenstellung

### 2.1 Anlass für das Vorhaben und Ausgangssituation

Abgesehen von elektrisch beheizten Industrieöfen, erfolgt die Bereitstellung von Prozesswärme oder industrieller Nutzwärme in der Regel durch die Verbrennung von Brennstoffen fossilen Ursprungs. Im Jahre 2016 lag der Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland bei etwa 3.748 TWh [1]. Nach Energieumwandlungs- und Übertragungsverlusten konnten davon ca. 2.517 TWh verwertet werden. **Abbildung 2.1** zeigt den Endenergieverbrauch in den unterschiedlichen Sektoren. Der Energieträgeranteil am Endenergieverbrauch im Industriesektor zeigt ein großes Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Senkung. Etwa 38 % des Endenergiebedarfs in der Industrie von 722 TWh werden durch Mineralöl und Erdgas gedeckt.



*Abbildung 2.1: Endenergieverbrauch nach Sektoren links und Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch im Industriesektor im Jahr 2016 [1].*

Derzeit wird in verschiedenen Studien evaluiert, welchen Beitrag die Industrie zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Ziele liefern kann. In einer vom BDI durchgeführten Studie [2] wurden zwei Maßnahmen als Wesentlich zur Erreichung der Ziele benannt:

- die Verringerung des Energiebedarfs durch Steigerung der Effizienz sowie
- die Substitution fossiler Energieträger durch regenerative Alternativen.

Effizienzmaßnahmen in der Industrie (z. B. Wärmerückgewinnung aus Verbrennungsabgasen) sind bereits heute Stand der Technik. Die Nutzung erneuerbarer Brennstoffe hingegen trägt bislang nur geringfügig zur CO<sub>2</sub>-Einsparung bei, obwohl in aktuellen Studien gezeigt wurde, dass die biomassebasierten Brennstoffe nach wie vor eines der wichtigsten Potentiale zur CO<sub>2</sub>-Einsparung in der Industrie darstellen [2]. Als Hemmnis für die Verbreitung erneuerbarer Brennstoffe in der Industrie kann zum einen die noch nicht flächendeckende Verfügbarkeit angesehen werden. Zusätzlich stellt die Brennstoffdiversität Brennerhersteller und Anlagenbetreiber vor technologische Herausforderungen, die im Wesentlichen auf das im Vergleich zu konventionellen Energieträgern abweichende Verbrennungsverhalten zurückzuführen sind. Zudem ergeben sich Herausforderungen in Bezug auf die Handhabung und Aufbereitung der erneuerbaren

Brennstoffe. Im Gegensatz zu dem derzeit hauptsächlich zum Einsatz kommenden Erdgas liegen regenerative Energieträger jedoch häufig in flüssiger Form vor, was besondere Anforderungen sowohl an die Bereitstellung (z. B. Lagerung, Brennstoffzufuhr zum Brenner, thermische Konditionierung des Brennstoffs), als auch an die Verbrennung und Abgasnachbehandlung stellt.

Die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen der Nutzung von Biobrennstoffen der 1. Generation wurden in einem ersten IGF-Forschungsvorhaben (IGF-Fördernr.: 18188N) adressiert, in welchem die technische Realisierbarkeit eines Kombi-Biobrennstoff-Brenners mit einer Leistung von bis zu 300 kW gezeigt werden konnte [3].

Im Zuge der europäischen Gesetzgebung (hier insbesondere die „RED-Renewable Energy Directive“ [4]) werden erneuerbare Energieträger der 1. Generation (z. B. Biodiesel und Bioethanol) nur noch eingeschränkt in Anrechnung gebracht. Die jüngst verabschiedete RED II [5] sieht lediglich für erneuerbare Kraftstoffe der 3. Generation ein ausreichendes CO<sub>2</sub>-Einsparpotential vor. Für den industriellen Bereich interessant werden hier insbesondere Brennstoffe, die aus biogenen Reststoffen hergestellt werden und eine vergleichsweise geringe Verarbeitungstiefe aufweisen. Ein Beispiel sind die sogenannten Pyrolyseöle aus Bioabfällen wie Holz oder Stroh, die sich durch ein hohes CO<sub>2</sub>-Einsparpotential auszeichnen. Eigenschaften wie eine hohe Viskosität oder ein hoher Wassergehalt machen jedoch ein ausgesprochen aufwändiges Fuel-Handling notwendig [5]. Neben der Nutzung biogener Brennstoffe, werden von Seiten der Anlagenbetreiber aktuell vermehrt Anstrengungen unternommen, prozessbasierte Rest- und Abfallstoffe für die thermische Energiegewinnung zu nutzen. Hierzu gehören beispielsweise Pyrolyseöle aus Altreifen, oder auch Rückstandsöle aus industriellen Produktionsprozessen (Residual Fuel Oil, RFO). Je nach Herkunft weisen diese Stoffe ähnliche Eigenschaften wie die biogenen Pyrolyseprodukte auf und können ggf. mit vergleichbaren Verbrennungskonzepten gehandhabt werden. Voraussetzung für die Nutzung alternativer Brennstoffe ist die Möglichkeit der Integration in bestehende Prozessinfrastrukturen.

Ziel des Vorhabens „InteBRA“ ist die Weiterentwicklung des im Projekt „Kombibrenner für biogene Brennstoffe“ [3] erarbeiteten Verbrennungskonzeptes für die Nutzung von Biobrennstoffen der 2. und 3. Generation sowie von industriellen flüssigen und gasförmigen Nebenprodukten. Die wissenschaftlichen Untersuchungen zielen darauf ab, ein besseres Verständnis für die Herausforderungen bei der Nutzung moderner und erneuerbarer gasförmiger und flüssiger Energieträger zu entwickeln und geeignete Lösungen in einem Verbrennungskonzept im industriellen Maßstab zu implementieren. Die Behandlung folgender Aspekte wurden als wesentlich für die Nutzung alternativer Brennstoffe in modernen Brennverfahren identifiziert:

#### Hoher Wassergehalt im Brennstoff

Flüssige Abfall- und Reststoffe sowie moderne biogene Brennstoffe wie z. B. Pyrolyseöl aus biologischen Reststoffen weisen häufig einen hohen Wassergehalt > 20 % auf, siehe **Tabelle 2.1**. Die Wasserphase stellt eine enorme Herausforderung für die Betriebssicherheit dar, insbesondere für das Zündverhalten und die thermische Stabilität der Flamme. In der Regel sind Maßnahmen zur Stabilisierung des Verbrennungsprozesses notwendig, wie beispielsweise die Zugabe von Erdgas. Oftmals werden flüssige Rest- und Abfallstoffe in eine stabile Erdgas- oder Heizölflamme eingedüst, um dort nachverbrannt zu werden. Der

Verbrennungsprozess wird auf die Stabilität der konventionellen Verbrennung ausgelegt, die Eigenschaften des niederkalorischen Brennstoffs (LCVF) bleiben dabei unberücksichtigt. Ziel muss jedoch sein, den Anteil der fossilen Energieträger zu minimieren und den Heizwert der Abfallstoffe optimal zu nutzen.

#### Brennstoffgebundener Stickstoff

Biogene Brennstoffe enthalten häufig brennstoffgebundenen Stickstoff, z. B. Ammoniak oder Cyanwasserstoff, der direkte Auswirkung auf die Bildung von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) hat und damit die Einhaltung von Grenzwerten deutlich erschwert. Am GWI sind im Rahmen eines AiF-Projektes [6] verschiedene Brennerkonzepte weiterentwickelt worden, um  $\text{NO}_x$ -Emissionen aus diesem Bildungspfad deutlich zu reduzieren. Die Brennergeometrien basieren ebenfalls auf dem im Vorgängerprojekt eingesetzten COSTAIR-Prinzip. Hier sind jedoch weiterführende Entwicklungen und Untersuchungen notwendig, um die Erkenntnisse auf die in „InteBRA“ zu betrachtenden Brennstoffe zu übertragen und die Brennergeometrie für reale industrielle Anwendungsfälle zu optimieren.

#### Verbrennungsrückstände im Abgas

Bei der Verbrennung von Pyrolyseölen biogener Herkunft sowie bei flüssigen Rest- und Abfallstoffen kann es aufgrund von anorganischen Inhaltsstoffen zur Bildung von Rückständen (Aschen / Salzen) kommen. Diese können zu unerwünschten Nebeneffekten führen, wie z. B. Ablagerungen in der Brennkammer und auf Wärmeübertragern. Während sich die Bildung von Partikeln und Aerosolen im Abgas kaum vermeiden lässt, kann die Form, in der die Rückstände vorliegen (Partikelgröße, Feuchtigkeitsgehalt) durch die Gestaltung des Verbrennungsprozesses beeinflusst werden. Hierdurch können gegebenenfalls die Voraussetzungen für die Durchführung von Sekundärmaßnahmen zur Abgasreinigung verbessert werden. Die Bildung von Aschen aus der Verbrennung flüssiger Reststoffe ist noch weit weniger untersucht als bspw. bei festen Brennstoffen. Gleiches gilt für die Möglichkeit der Einflussnahme auf den Ausbrand und die Ausbildung von Ablagerung durch eine Beeinflussung des Verbrennungsprozesses.

#### Systemintegration eines Vorverdampfungs- und Gemischbildungskonzeptes für flüssige Brennstoffe

Neben der Beherrschung der prozesstechnischen Herausforderungen ist es notwendig, dass neue Verbrennungskonzepte in den Gesamtprozess integrierbar sind. Dies gilt insbesondere für die Nutzung in Bestandsanlagen, die im Zuge von Modernisierungsmaßnahmen (Revamping) auf alternative Energieträger umgestellt werden sollen. Begrenzter Bauraum und anspruchsvolle thermische Randbedingungen gehören zu den Herausforderungen, die bei der Systemintegration zu lösen sind. Im Projekt wird daher angestrebt, die derzeitige externe Vorverdampfung der flüssigen Brennstoffe [3] mit einer aerodynamisch von der Gemischbildung und Verbrennung getrennten Zone in den Brenner zu integrieren, den derzeitigen komplexen Bauaufwand deutlich zu minimieren und die Nutzung der Prozesswärme zu erleichtern.

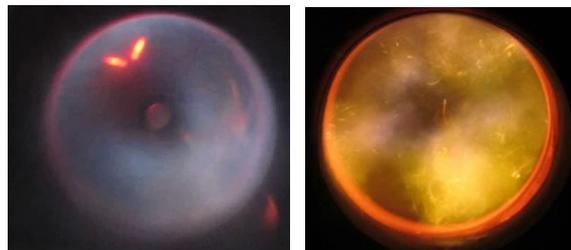
Gesamtziel ist es die angeführten Aspekte wissenschaftlich zu untersuchen und die Erkenntnisse in einem Funktionsmuster umzusetzen. Es soll ein integrales Brennerkonzept mit einem Vorverdampfer für flüssige Brennstoffe im industriellen Maßstab (100 kW) für den Einsatz von sowohl gasförmigen, als auch flüssigen Biobrenn-, Rest- und Abfallstoffen entwickelt werden. Dabei wird neben der Verbrennung selbst auch die anwendungsnahe Umsetzung unter Berücksichtigung industrieller Randbedingungen sowie die

Anforderung an die Handhabung aerosolbelasteter Abgase z. B. bei der Rekuperation von Abgaswärme adressiert. Aufgrund der komplexen Brennstoffmatrix (gas / flüssig) und der besonderen wissenschaftlichen Kompetenzen insbesondere auf den Feldern der NO<sub>x</sub>-Reduktion sowie der Analyse der Partikelemissionen wird das Forschungsvorhaben als Kooperationsprojekt zwischen dem GWI und OWI ausgeführt.

## 2.2 Stand der Forschung und Entwicklung

### 2.2.1 Verbrennung von Pyrolyseölen, Rückstandsölen und Reststoffen

Die schnelle Pyrolyse ist ein Prozess, bei dem organische Reststoffe (z. B. Biomasse) unter Abwesenheit von Luft auf 450 – 550 °C erhitzt werden. Das entstehende Pyrolysegas wird zu sogenanntem Pyrolyseöl (FPBO – „Fast Pyrolysis Bio Oil“) mit einer typischen Ausbeute von 60 - 75 Gew.-% des Einsatzmaterials kondensiert. Hierbei wird die Mehrheit der Aschen und der Mineralien in der Kohle gebunden und kann aus dem Prozess gewonnen werden. Etwa 70 % des ursprünglichen Energiegehalts sind im flüssigen Brennstoff enthalten. Eine Pyrolyseanlage in kommerzieller Größe (50.000 t/a Pyrolyseöl) wurde von den Unternehmen Fortum und Valmet in Joensuu, Finnland in Betrieb genommen [7]. Eine weitere Anlage (5 t/h) wird von den Firmen BTL-BTG und Twence in Hengelo/Niederlanden betrieben [8]. Weitere Anlagen sind in der Planung. Die Anstrengungen der nationalen und internationalen Forschung lagen in der Vergangenheit überwiegend auf der Entwicklung von Prozessstrategien zur Pyrolyseölproduktion. Um zukünftig fossile Energieträger in stationären Anwendungen wie Kesseln und Öfen substituieren zu können, ist die Entwicklung neuer Verbrennungskonzepte notwendig, die die besonderen Eigenschaften von biogenen Brennstoffen mit niedrigem Verarbeitungsgrad berücksichtigen können. Die grundsätzliche Machbarkeit der großtechnischen Verbrennung von FPBO auf Holzbasis wurde bereits nachgewiesen [9-11]. Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts des OWI wurden die technischen Voraussetzungen für die Verwendung von Pyrolyseöl im Raumwärmemarkt untersucht [12]. Bisherige Untersuchungen haben diverse Schwierigkeiten bezüglich der Anwendbarkeit von Pyrolyseölen in technischen Applikationen wie Ölbrennersystemen aufgezeigt. So beeinträchtigt die hohe Viskosität die Pump- und Zerstäubungsfähigkeit und hohe Säurezahlen führen zu Korrosion an brennstoffführenden Komponenten.



*Abbildung 2.2: Vergleich einer Pflanzenöflamme (links) mit einer Pyrolyseöflamme (Altholz) (rechts) [12]. Deutlich sind in der Pyrolyseöflamme die festen Bestandteile zu erkennen.*

Der Heizwert ist aufgrund des hohen Wasser- und Sauerstoffgehaltes deutlich reduziert gegenüber konventionellen Brennstoffen wie Heizöl. Verbrennungstechnische Eigenschaften wie z. B. der Siedeverlauf weichen von denen konventioneller Brennstoffe und Pflanzenölen ab. Bei den in **Abbildung 2.2** dargestellten Feuerungen, die mit einem ähnlichen Verbrennungskonzept im Labormaßstab umgesetzt wurden, wird unmittelbar der Einfluss der oben beschriebenen Besonderheiten auf das Flammenbild deutlich. Die

blaue Flamme weist auf eine Verbrennung mit ausgesprochen emissionsarmer Verbrennung hin. Die gelbe Flamme der Pyrolyseölfeuerung zeigt ein hohes Rußbildungspotential in der Flamme. Während Stickoxid- und CO-Emissionen durch geeignete Verbrennungsführung im Bereich der gesetzlichen Vorgaben gehalten werden können, sind es insbesondere das Auftreten fester und flüssiger Bestandteile im Abgas (Aschen, kohlenstoffhaltige Partikel, Salze), die ggf. neue Herausforderungen an die Gestaltung der Reaktionszone und die Handhabung der Abgasströme stellen. Dies gilt im Wesentlichen auch für die Verbrennung von Rückstandsölen. Die Verwendung von Rückstandsölen als Kraftstoff, so genannte Schweröle oder „Bunker-Fuels“, ist heute insbesondere in der Schifffahrt und auch in der Industrie Stand der Technik. Die Anforderungen hinsichtlich der Emissionen steigen auch in diesen Branchen stetig.

Rückstandsöle aus der industriellen Produktion treten im Wesentlichen als Abfallstoff auf und weisen oft ähnliche Eigenschaften wie Schweröle auf (**Tabelle 2.1**). Jedoch muss mit weiteren Kontaminationen aus der Produktion gerechnet werden. Idealerweise werden Rückstandsöle unmittelbar innerhalb des Industrieprozesses der thermischen Verwertung zugeführt. Die Firma Covestro, eines der weltweit größten Polymer-Unternehmen, hat zusammen mit dem Unternehmen LyondellBasell ein Innovationsprojekt gestartet. Im Rahmen des „Circular Steam Projekt“ sollen wasserbasierte Abfallstoffe in Energie umgewandelt werden. Am Standort Massvlakte-Rotterdam sollen damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen um jährlich etwa 140.000 t gesenkt und darüber hinaus die Freisetzung von Salzurückständen vermieden werden [13].

**Tabelle 2.1: Zusammensetzung verschiedener Brennstoffe und Rückstandsöle im Vergleich zu Heizöl EL und Pflanzenöl.**

Eigenschaften		Heizöl Extra Leicht	Heizöl Leicht	Heizöl Schwer	Waste water	Residual oil Nr.1	Residual oil Nr.2	Pyrolyseöl Altholz	Pyrolyseöl Altreifen	Palmöl
Flammpunkt	°C	62	>100	>100	98	93 - 119	65 - 75		<21	220
Heizwert	MI/kg	42,8	>41	>39	2,5 - 3	32 -33	25 - 27	16,8	42,8	36,5
kin.Viskosität $\mu$	mm <sup>2</sup> /s	3,7	< 17	15 - 50	1,5	/9	100	8,5	4 - 5	54
dyn.Viskosität $\nu$	g/mm s	4,4	<15,5	14,6 - 51	1,3	150 - 200/ 10	97	7	3,75 - 4,7	59
		20°C	15°C	100°C	20°C	45°C/90°C	50°C	80°C	20°C	20°C
Dichte	kg/dm <sup>3</sup>	0,844	<1,1	0,98 - 1,03	1,12	1,07	1,03	1,21	0,935	0,91 - 0,925
Schwefel	ppm <sub>wt</sub>	23	< 2000	<3500	<500	3		10 - 30	1270	10
Asche	ppm <sub>wt</sub>	10	40	60			200	10 - 670		10
Zusammensetzung										
H <sub>2</sub> O	% <sub>wt</sub>	0,003	0,4	0,5	80 - 100			21	0,51	
Total organic carbon	% <sub>wt</sub>				20					
Organic sodium salt	% <sub>wt</sub>				10 - 15					
sodium salt	% <sub>wt</sub>				4,1	2 - 4				
Organic peroxides	ppm <sub>wt</sub>				50					

Den genannten Energieträgern ist gemein, dass bereits im Brennstoff Komponenten vorliegen, die zur Bildung von Aschen und anderen nicht brennbaren Komponenten im Abgas führen. Während im Anwendungsbereich der Abfallverbrennung vielfach Erfahrungen mit der Entstehung und dem Phasenwechsel von Aschen und anderen Rückständen vorliegen, sind über die Partikelfrachten und Partikelherkunft bei der stationären Pyrolyseölverbrennung bis heute nur wenig Forschungsergebnisse bekannt [9,14]. Die Partikelfrachten hängen in erster Linie vom Anteil nicht brennbarer Feststoffe im Brennstoff ab. Hinzu kommt Ruß, dessen Bildung durch eine geeignete Mischung und Verbrennungsführung minimiert werden kann. Abfallstoffe können anorganische Bestandteile enthalten wie etwa Natrium, das in Form von Natriumcarbonat als Rückstand verbleibt. Weitere höhermolekulare Verbrennungsrückstände wie Teere können sich in der Brennkammer oder im Abgasweg ablagern.



Abbildung 2.3: Verdampferoberfläche eines Vormischbrenners nach 100 Betriebsstunden mit a) Heizöl EL schwefelarm +5 % FAME und b) nach Anhebung der Verdampfertemperatur [15].

Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung von Brennern für flüssige Energieträger ist die Vermeidung von hochpolymeren Ablagerungen. Diese treten insbesondere in Bereichen mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen (z. B. Brennerkopf, Einspritzdüse) und gleichzeitig hohen Brennstoffkonzentrationen auf. Besonders kritisch sind heiße Oberflächen, die vom Brennstoff benetzt werden. Für bereits heute am Markt verfügbare konventionelle und regenerative Brennstoffe wurden in von der IGF geförderten Projekten Methoden entwickelt, die eine Analyse des Potentials zur Ablagerungsbildung unter der Berücksichtigung der Brennstoff-Komponenten-Interaktion ermöglichen [15,16]. Weiterhin wurden Verfahren ermittelt, mit denen belegte Oberflächen regeneriert werden können, siehe **Abbildung 2.3**. Für den Einsatz von Pyrolyse- oder Rückstandsölen wurden bislang keine Untersuchungen zur Ablagerungsbildung durchgeführt.

### 2.2.2 Mehrstoffverbrennung regenerativer Brennstoffe

Im Vorgängervorhaben [3] konnte bereits ein neuer Ansatz für eine Mehrstoffverbrennung von gasförmigen und flüssigen biogenen Brennstoffen erfolgreich umgesetzt werden. Das realisierte Konzept basierte auf einer Vorverdampfung der flüssigen Brennstoffe durch eine Stabilisierung von Kalte-Flammen-Reaktionen bzw. einer partiellen Oxidation des Brennstoffs. Die Energie für die Verdampfung wurde aus dem Brennstoff selbst bezogen. Dieses Konzept konnte erfolgreich auf biogene Flüssigbrennstoffe der 1. Generation angewandt werden. Die Verbrennung erfolgte im Anschluss in einem luftgestuften COSTAIR-Drallbrenner. **Abbildung 2.4** verdeutlicht den konstruktiven Aufbau des entwickelten Brenners für die kombinierte Verbrennung von Öldampf und Schwachgas.

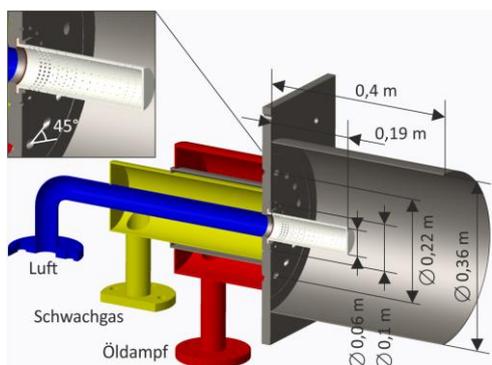


Abbildung 2.4: Brennerkonstruktion ausgelegt für eine thermische Leistung von 300 kW [3].

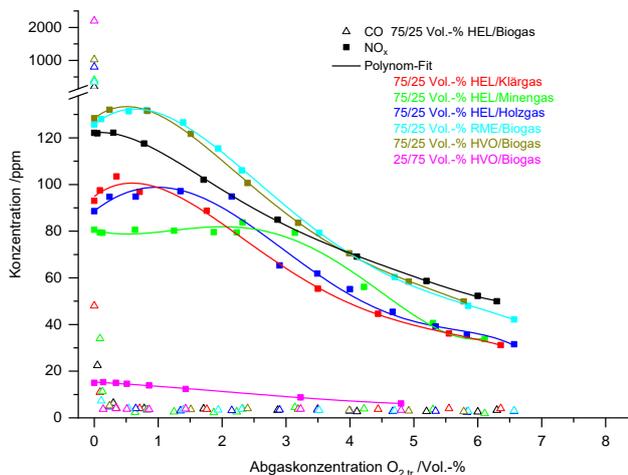


Abbildung 2.5: Abgasemissionen gemessen im Versuchsofenauslass bei 300 kW [3].

Der Brenner wurde optimiert für den gleichzeitigen Einsatz von biogenen schwachkalorischen Gasen und vorverdampften Flüssigbrennstoffen in beliebigen Anteilsverhältnissen. Das primäre Entwicklungsziel lag in der Gewährleistung einer stabilen, schadstoffarmen Verbrennung mit geringen NO<sub>x</sub>- und CO-Emissionen im Rahmen der TA Luft [17]. Dieses Ziel wurde in dem Projektrahmen erreicht und die Funktion des Gesamtkonzepts aus Brenner und Vorverdampfer für eine industrierelevante Leistungsklasse experimentell demonstriert. **Abbildung 2.5** zeigt die Ergebnisse der Abgasuntersuchung für den Betrieb im GWI-Versuchssofen bei 300 kW thermischer Leistung.

Das bestehende Vorverdampfungskonzept ist allerdings auf den Einsatz von biogenen Brennstoffen der 1. Generation beschränkt und auf eine erweiterte Brennstoffmatrix mit Biobrennstoffen der 2. und 3. Generation nicht anwendbar. Zudem fordert der Einsatz kontaminierter Rest- und Abfallstoffe mit hohen Wasser-, Stickstoff- und Ascheanteilen sowie der Neigung zu Partikelbildung zunächst eine grundlegende theoretische Betrachtung und Charakterisierung der Brennstoffe sowie nachfolgend eine entsprechende Anpassung des Brennerkonzeptes, da diese Bestandteile in der Auslegung bisher keine Berücksichtigung fanden bzw. nicht relevant waren. Zudem soll das bestehende Brennerkonzept für die Rückgewinnung von Abgaswärme weiterentwickelt werden. In dem Vorgängerprojekt konnte bereits gezeigt werden, dass die Brennerkonstruktion partiell thermisch hoch belastet und eine hohe Wärmemenge über die Brennerkonstruktion ausgekoppelt wird, die wiederum prinzipiell für eine Medientvorwärmung bzw. Vorverdampfung von Flüssigbrennstoffen genutzt werden kann. Zudem konnte bereits gezeigt werden, dass eine schadstoffarme Verbrennung für eine große Matrix gasförmiger biogener Brennstoffe in Kombination mit Bioölen in einem Brennerauslegungspunkt nahezu uneingeschränkt möglich ist. Die Ausweitung der Matrix flüssiger Brennstoffe muss daher die konsequente Weiterführung der Entwicklung des Mehrstoffbrenners darstellen. Die hohe Brennstoffflexibilität stellt ein wesentliches technisches Merkmal dar. Darüber hinaus unterscheidet sich das hier zum Einsatz kommende Konzept von herkömmlichen Mehrstoffbrennerkonzepten dadurch, dass es ohne eine unterstützende Verbrennung mit konventionellen Brennstoffen, meist Erdgas, auskommt. Die hohe Flexibilität in Bezug auf die Einsatzstoffe und eine Verbrennung ohne eine konventionell betriebene Stützflamme, ermöglicht es in größerem Umfang CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen und gleichzeitig Betriebskosten zu senken. Einen wichtigen entwicklungstechnischen Kernaspekt wird die Überführung der Flüssigbrennstoffe in die Dampfphase darstellen, die in diesem Projektrahmen detailliert untersucht wird.

### 3 Forschungsziel / Forschungsergebnisse / Lösungsweg

#### 3.1 Forschungsziel

Die Prozessschritte Brennstoffzerstäubung, -verdampfung und die Freisetzung der für die Verdampfung benötigten Wärmemenge finden derzeit in einem vom Brenner räumlich getrennten Reaktor statt. Forschungsziel ist die Integration dieser Prozessschritte in die Brennergeometrie. Durch eine geeignete Strömungsführung wird eine Reaktionszone für die Vorverdampfung innerhalb der Brennergeometrie noch vor Mischung mit Verbrennungsluft und Eintritt in die Verbrennungszone geschaffen. Dabei kommen mechanische Aerosolgeneratoren (z. B. Einstoffdüse, Mehrstoffdüse, Rotationszerstäuber) zum Einsatz, um eine schnelle Verdampfung der Brennstoffe zu gewährleisten. In [18] wurde HEL in temperiertem inertem Abgas verdampft. Diese Vorgehensweise funktioniert nicht in Kombination mit dem Konzept der kontinuierlichen Luftstufung, da das Abgas nicht über einen Rekuperator abgezogen wird. Ferner müsste zum Ende des Prozesses noch ein Temperaturniveau von min. 500 °C erreicht werden, um Pflanzenöl und Pyrolyseöl vollständig zu verdampfen. Der Siedebereich von Pyrolyseöl liegt zwischen 100 °C und 600 °C, wobei ca. 95 Massen-% des Pyrolyseöls schon bei Temperaturen unterhalb von 500 °C sieden. Da eine Verdampfung des Brennstoffes auch unterhalb der Siedetemperatur möglich ist, reicht eine Temperatur von 500 °C in der Verdampfungszone aus.

#### 3.2 Forschungsergebnisse

##### 3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Es werden die folgenden Forschungsergebnisse angestrebt:

- Entwicklung eines rekuperativen Verdampfungskonzepts für biogene Flüssigbrennstoffe der 2. und 3. Generation sowie flüssige Rest- und Abfallstoffe,
- Systemische Integration des Verdampfungskonzepts in einen COSTAIR-Brenner,
- Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens kontaminierter Brennstoffe mit hohem Wassergehalten, Untersuchung maximal möglicher Wasserbeladungen,
- Optimiertes Brennerkonzept für die Verbrennung von Brennstoffen mit hohem brennstoffgebundenen Stickstoffanteilen,
- Untersuchung der Partikelentstehung und des Partikeltransports aus der Verbrennung flüssiger Brennstoffe und die Auswirkungen auf die Temperaturverteilung im Ofenraum,
- Gewährleistung eines stabilen und schadstoffarmen Betriebs sowohl mit gasförmigen, als auch flüssigen Brennstoffen sowie Kombinationen aus beiden unter anwendungsnahen Bedingungen.

### 3.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Der Ansatz der rekuperativen Nutzung von Abgaswärme für die Verdampfung flüssiger Brennstoffe stellt eine innovative Neuerung dar. Das Konzept soll sich durch eine hohe Brennstoffflexibilität auszeichnen, sowohl hinsichtlich flüssiger Brennstoffe, als auch schwachkalorischer Gase. Bestehende Mehrstoffbrennerkonzepte basieren auf einer (i. d. R. Erdgas-)Stützflamme. Der angestrebte Brenner soll im Gegensatz dazu im Dauerbetrieb ohne Stützflamme bzw. Zufuhr konventioneller Brennstoffe auskommen.

### 3.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Zur Realisierung dieses Projektes werden insgesamt 6 Arbeitspakete durchgeführt. Die Arbeitspakete 3 und 4 finden in Zusammenarbeit beider Institute statt. Es wird ein herausgearbeitetes Konzept zur technischen Umsetzung weiterverfolgt. Für die experimentelle Erprobung wird ein Funktionsmuster mit einer Leistung von 100 kW konstruiert und gefertigt. Dieses Funktionsmuster wird am GWI in Betrieb genommen und untersucht. Die Inhalte der Forschungsarbeiten sind nachfolgend erläutert.

#### Untersuchung weiterer Produkt- und Biogase

Die Quellen für Produkt- und Biogase sind vielfältig. Dazu zählen die Vergasung oder Fermentation von Biomassen (Gülle, organische Reststoffe), Klärwerke, Deponien oder auch Kohlegruben. Darüber hinaus kommen als potentielle Brennstoffe Produkt-, Rest- und Schutzgase aus Industrieprozessen in Frage, die aufgrund ihrer niedrigen kalorischen Gehalte nicht oder nur schwer einer energetischen Nutzung zugeführt werden können. Für die Verbrennung in Frage kommen prinzipiell alle Synthesegase. Charakteristisch für diese Gase sind hohe Inertgas-Anteile ( $N_2$ ,  $CO_2$ ) und je nach Ursprung und Verfahren nicht unerhebliche Wasseranteile. Die kalorischen Gehalte werden im Westlichen durch die Anteile der Komponenten  $CO$ ,  $H_2$  und  $CH_4$  definiert. Im Rahmen des Projektes sollen unterschiedliche Synthesegase durch Mischung von Einzelgasen abgebildet werden und die Auswirkungen auf das Stabilitätsverhalten und die Schadstoffemissionen auf die kombinierte Feuerung mit Flüssigbrennstoffen untersucht werden.

Konkret stehen im Fokus der Untersuchungen Produktgase aus Fermentations- und Vergasungsprozessen, wie sie beispielsweise bei der Behandlung von Biomassen oder Klärschlämmen entstehen. Für den Bereich der kommunalen Klärschlammvergasung bietet sich ein jährliches Potential von ca. 2 Mio. t Klärschlamm-trockensubstanz in Deutschland [19]. Je nach organischem Anteil in der Trockensubstanz liegt der Heizwert des trockenen Klärschlammes zwischen 8 MJ/kg und 16 MJ/kg. Hier liegen gerade für kommunale Entsorgungsbetriebe mit deutschlandweit ca. 9.100 Abwasserbehandlungsanlagen, in denen für die Verwertung Brennersysteme bspw. für die Trocknung benötigt werden, große Anwendungspotentiale. Auch bei der Nutzung von Biogas bestehen noch erhebliche Potentiale, laut Umweltbundesamt ist allein bei der Nutzung von Gülle eine Verdopplung auf ca. 60 % der in Deutschland anfallenden Gülle, entsprechend einer Vergärungskapazität von mehr als 100 Mio. t/a möglich. Für Bioabfallvergärungsanlagen wird ein Potential bis 2030 von 1,28 Mio. t/a gesehen. Bis zum Jahr 2050 wird in aktuellen Studien [20] ein Gesamtpotential zur Produktion von Biogasen bis zu 250 TWh/a, etwa aus der anaeroben Vergärung oder thermischer Umwandlung von Speiseabfällen, Ernteresten, Gülle oder Abfallholz gesehen. Hier bietet sich die Möglichkeit einer direkten Nutzung in industriellen Thermoprozessen vor allem für KMU, wie es z. B.

in [21] dargestellt wurde. In Anlehnung an das Vorgängervorhaben, werden im Rahmen der experimentellen Erprobung niederkalorische Brenngase mit Heizwerten im Bereich von 4 bis 14 MJ/kg eingesetzt. Die Gase werden wie bisher aus den Hauptbestandteilen CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> synthetisch hergestellt. Darüber hinaus werden in diesem Projektrahmen die Einflüsse von Wasser(dampf-)anteilen im Brenngas auf das Verbrennungs- und Schadstoffverhalten untersucht, die bisher unberücksichtigt blieben.

#### Charakterisierung des Verdampfungsverhaltens biogener Brennstoffe

Behling, Danz und Marzi haben für feste Abfallbrennstoffe und Biomasse experimentell die Freisetzung von Flüchtigen bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht [22], mit Hilfe derer die Kinetik der Freisetzungsreaktionen bestimmt werden kann und wesentlich den Verbrennungsablauf bestimmt. Ähnliches gilt auch für flüssige Brennstoffe, welche vor der Verbrennung zunächst verdunstet werden müssen. Daher soll das Verdampfungsverhalten umfangreich untersucht werden. Ausgangspunkt der Methodentwicklung ist die Thermogravimetrische Analyse (TGA) der Brennstoffe. Hierbei werden die Brennstoffproben in einem Probenträger erhitzt. Die Temperaturänderung folgt einem genau definierten Profil, z. B. einer Temperaturrampe. Der Massenverlust der Proben wird durch Wägung kontinuierlich aufgezeichnet. Auf diese Weise erhält man die Massenänderung in Abhängigkeit von der Probentemperatur. Aufgabe in diesem Arbeitspaket ist die Entwicklung eines geeigneten Temperaturprogramms, mit dem charakteristische Massenänderungsprofile für die Brennstoffe ermittelt werden können. Hierbei wird von den Stoffeigenschaften des Brennstoffes Gebrauch gemacht, die in unterschiedlichen Temperaturfenstern in die Gasphase übergehen. Dabei werden zunächst die flüchtigen Bestandteile verdampft. Um eine Oxidation zu vermeiden, wird dieser in einem ersten Intervall in inerter Atmosphäre durchgeführt. Durch eine gezielte Erhöhung des Sauerstoffpartialdrucks werden anschließend kohlenstoffhaltige Rückstände oxidiert. Es ist zu erwarten, dass die Bildung dieser Rückstände ganz wesentlich vom Temperaturgradienten beeinflusst wird. Am Schluss der Prozedur verbleiben die nicht brennbaren Rückstände. Neben dem Temperaturgradienten ist der Sauerstoffpartialdruck ein wichtiger Parameter, da dieser die Untersuchung des Einflusses der Reaktion auf den Verdampfungsvorgang ermöglicht. Die Methodik soll erste Aussagen zur Charakterisierung des Brennstoffs liefern, die als Richtgrößen für die Auslegung der Vorverdampfung dienen:

- Verdampfungsraten des Brennstoffs in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur und vom Sauerstoffpartialdruck,
- Einfluss des Temperaturgradienten auf die Bildung kohlenstoffhaltiger Rückstände.

Darüber hinaus soll im Rahmen dieser Untersuchungen auch der Wasseranteil des Brennstoffes bestimmt werden und die Option der Trocknung sowohl hinsichtlich Wirkungsgrads des Gesamtprozesses und Verbesserung des Verbrennungsverhaltens bewertet werden.

Diese und auch die nachfolgenden Untersuchungen sollen für eine möglichst große Anzahl von Biobrennstoffen und Reststoffen durchgeführt werden, um eine breite Wissensbasis für die Auslegung von Brennersystemen zu erzeugen.

### Untersuchungen zur Bildung hochpolymerer Ablagerungen an beheizten Oberflächen im Gemischbildungsraum

In diesen Untersuchungen wird die Neigung von Brennstoffen zur Bildung von Ablagerungen bei der Benetzung heißer Oberflächen untersucht. Ein wichtiger Parameter ist hier die Temperatur von Oberflächen, auf die der flüssige Brennstoff z. B. im Vorverdampfungs- und Gemischbildungsbereich trifft [16]. Um den Benetzungsvorgang unter reproduzierbaren Bedingungen nachzubilden, wurde in verschiedenen IGF-Projekten ein spezieller Versuch entwickelt, in dem ein definierter Brennstoffmassenstrom über einen langen Zeitraum auf eine beheizte Fläche getropft wird. Abhängig von verschiedenen Randbedingungen wie etwa der Temperatur und der Rauheit der benetzten Fläche, kommt es zur Bildung von Ablagerungen. Die Wachstumsrate der Ablagerungen lässt sich gravimetrisch bestimmen und ist ebenso charakteristisch für den Brennstofftyp wie für die Beschaffenheit der bestehenden Ablagerungen. Ziel dieser Untersuchungen ist die Ermittlung der Randbedingungen des Vorverdampfers, bei denen Ablagerungen weitestgehend vermieden werden müssen. Da sich Ablagerungen in technischen Systemen oft nicht vollständig vermeiden lassen, werden außerdem Strategien für eine thermische Regeneration entwickelt.

### Brennero Optimierung hinsichtlich Reduzierung der Stickoxidbildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff

Schwachkalorische Gase wie beispielsweise Synthesegase aus der Vergasung von Klärschlämmen enthalten häufig Stickstoffanteile in Form von Ammoniak oder Cyanwasserstoff. Die Stoffe werden während der Verbrennung nahezu vollständig zu Stickoxiden umgesetzt und erschweren die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten erheblich. Die Auswirkungen der Anwesenheit von Ammoniak in schwachkalorischen Gasen auf die Bildung von  $\text{NO}_x$  konnte bereits in [6] experimentell gezeigt werden, ebenso, dass eine deutliche Reduzierung durch eine geeignete Prozessführung mit Hilfe von gestufter Verbrennungsluftzuführung in Kombination mit einer Abgasrezirkulation möglich ist und der Einsatz einer kostenintensiven Abgasnachbehandlung über selektive (nicht-) katalytische Reduktionsverfahren (SCR bzw. SNCR) zur Einhaltung der Grenzwerte u. U. vermieden werden kann. In diesem Projektrahmen soll die Luftstufung des COSTAIR-Brenners für die Verbrennung von stickstoffhaltigen Brennstoffen weiterentwickelt werden. Erfahrungen aus vergangenen Projekten haben gezeigt, dass lokal hohe thermische Belastungen zu Beschädigungen an der zentralen Luftverteilerdüse führen können. Alternative Ansätze für die Auslegung und das Design der Luftstufung sollen daher in die Entwicklung einbezogen werden. Wesentliche Aspekte sind dabei:

- die Optimierung der Düsengeometrie und Anordnung für eine optimale Mischung von Brennstoff und Oxidator,
- die Neugestaltung der Stufung zur Optimierung der lokalen Verbrennungstemperaturen und Abgasverweilzeiten bis zum vollständigen Ausbrand bzw. die Optimierung der Ausprägung unterstöchiometrischer Bereiche,
- die Optimierung der Abgasrezirkulation durch Modifikation des Drallerzeugers bzw. der Brenngasdüsen.

### Skalierung des Brennerdesigns auf größere Leistungen und Überprüfung der Industrietauglichkeit

Das Konzept wurde bereits für zahlreiche industrielle Anwendungsfälle wie Kesselfeuerungen, Gasturbinen und zur Prozesswärmeerzeugung umgesetzt [23-27]. Dabei konnte die Skalierbarkeit des Brennerkonzeptes vom Kilowattbereich auf thermische Leistungen im Megawattbereich bereits gezeigt werden [23]. In [24] wurde das Konzept in einer Kesselfeuerung mit 1,5 MW umgesetzt und erfolgreich erprobt. Die Übertragbarkeit des Brennerkonzeptes auf großtechnische serienreife Anlagen wurde u. a. für Verbrennung von Pyrolysegas aus einer Biomasseverwertungsanlage erfolgreich demonstriert [27]. Der in Zusammenarbeit mit der Firma REW Regenerative Energie Wirtschaftssysteme GmbH entwickelte Brenner mit 500 kW Feuerungsleistung zeichnet sich durch hervorragende Schadstoffemissionswerte aus. Bei dieser Anwendung stellen Teerbestandteile im Pyrolysegas eine große Herausforderung dar. Teerbestandteile sind ähnlich problematisch hinsichtlich ihrer Zuführung und Verbrennungseigenschaften wie die in „InteBRA“ zu betrachtenden Stoffe. Speziell musste in diesem Fall ein geeignetes Wärmemanagement implementiert werden, um eine Auskondensation des Teeres aus dem heißen Pyrolysegas zu vermeiden. Es existieren somit bereits für den geplanten Projektrahmen relevante Erfahrungen aus der industriellen Anwendung in Bezug auf das Brennerkonzept. Die prinzipielle Skalierbarkeit des COSTAIR-Brenners für den kombinierten Einsatz von schwachkalorischen Brenngasen und Öldampf wurde bereits im Vorgängerprojekt [3] erfolgreich demonstriert, in dem je ein Baumuster, für zunächst 100 kW, später 300 kW thermische Leistung entwickelt wurde. Aufgrund des gesteigerten Entwicklungsanspruchs durch die Integration eines Brennstoffverdampfers, wird nachfolgend auf die Skalierung verzichtet und lediglich ein Baumuster für 100 kW thermische Leistung entwickelt und erprobt. Zudem werden die notwendigen Brennstoffmengen reduziert. Die Erprobung wird allerdings in zwei Arbeitsschritten durchgeführt. Zunächst erfolgen grundlegende Untersuchungen zum Verbrennungs- und Schadstoffverhalten. Die Industrietauglichkeit soll im Anschluss für eine Kesselanwendung gezeigt werden. Dazu erfolgt der Betrieb in einem 200 kW Prüfflammrohr am GWI, in dem eine exakte Stoff- und Energiebilanzierung möglich ist.

## 4 Brennstoffcharakterisierung und Voruntersuchungen

### 4.1 Brennstoffauswahl

Nachfolgend werden die für die Untersuchungen verfügbaren Flüssigbrennstoffe sowie die ausgewählten Brenngase und deren Eigenschaften beschrieben.

#### 4.1.1 Flüssige Brennstoffe

In **Tabelle 4.1** sind die flüssigen Brennstoffe aufgelistet, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden und **Abbildung 4.1** zeigt das farbliche Erscheinungsbild der Brennstoffflüssigkeiten.

*Tabelle 4.1: Auflistung der eingesetzten Brennstoffe.*

Handelsbezeichnung	Hersteller	Beschreibung
Shell Heizöl EL	Shell Deutschland Oil GmbH	Heizöl, Brennstoff
NExBTL Renewable Diesel Neste 100 % NExBTL-diesel Neste Green 100 -diesel	Neste Oil Singapore Pte Ltd	hydriertes Pflanzenöl (HVO), Motortreibstoff
cct-OE 175	cct Stegelitz GmbH	Altreifen-Pyrolyseöl
MeOH-Gemisch	Chem. Industrie	Methanolhaltiger Prozessrückstand
Destillationsrückstand	Chem. Industrie	Destillationsrückstand
Glycerin	Renewable Energy Group	Rückstand aus FAME-Herstellung
Biodiesel B	Renewable Energy Group	Destillationsrückstand
Fast pyrolysis bio-oil	BTG Biomass Technology Group BV	Pyrolyseöl (Hart-) Holzmix

Heizöl extra leicht (HEL) ist ein genormter Standardbrennstoff nach DIN 51603-1:2020-09 für den Raumwärmemarkt und für Industrieheizungen. Er dient in dieser Arbeit als Referenzbrennstoff. Hydriertes Pflanzenöl (HVO) wird aus tierischen Abfallfetten, gebrauchtem Speiseöl sowie verschiedenen Abfällen und Reststoffen aus der Pflanzenölverarbeitung hergestellt. Der in den Kohlenwasserstoffketten gebundene Sauerstoff wird unter Zugabe von Wasserstoff entfernt und die Kohlenwasserstoffketten isomerisiert. Es entsteht ein Brennstoff, der die Anforderungen, bis auf die Dichte, welche die DIN 51603-1:2020-09 an ein Heizöl stellt übererfüllt. Altreifen-Pyrolyseöl (APO) ist ein flüssiges, dunkelbraunes, fast schwarzes Prozessöl. Es fällt bei der Gewinnung von Ruß aus Altpolymeren als Nebenprodukt bei einem Quenchprozess von Pyrolysegas an. Seine verbrennungstechnischen Eigenschaften sind nahe denen eines Mitteldestillats. MeOH-Gemisch ist ein methanolhaltiger Prozessrückstand aus der Herstellung von Polymeren. Destillationsrückstand sind die hochsiedenden Fraktionen aus einem Destillationsprozess in der Herstellung von Kunststoffen. Glycerin fällt als Abfallprodukt aus der Abspaltung von

Kohlenwasserstoffketten der Altspeisefette bei der Herstellung von UCOME (Used cooking oil methyl ester) an. Biodiesel B-Ware ist ein Rückstandsöl welches bei der Herstellung von UCOME anfällt.

			
Heizöl extra leicht (HEL)	Vollhydriertes isomerisiertes Pflanzenöl (HVO)	Altreifenpyrolyseöl (APO)	Glycerin
			
Destillationsrückstand	MeOH-Gemisch	Biodiesel B-Ware	Pyrolyseöl (Hart-)Holzmix

Abbildung 4.1: Farbliche Erscheinung der eingesetzten Brennstoffe. (Quelle: OWI)

**Tabelle 4.2** zeigt soweit bekannt die Zusammensetzungen und die Heizwerte der zur Verfügung stehenden flüssigen Brennstoffe. Proben der im ersten Zwischenbericht aufgeführten Brennstoffe Caustic Waste Water und Residual Fuel Oil standen nicht zur Verfügung. Als Ersatz konnten die Brennstoffe Destillationsrückstand und MeOH-Gemisch akquiriert werden.

Tabelle 4.2: Festgelegte Brennstoffmatrix für flüssige Brennstoffe.

Brennstoff	Zusammensetzung in Ma.-%					H <sub>0</sub> [MJ/kg]
	C	H	O	N	S	
HEL s-arm	85,5	13,5	0,56	-	-	42,5
HVO	55,6	19,4	11,7	-	-	32,6
UCOME B-Ware	-	-	-	-	-	36,8
Glycerin	39,13	8,75	52,12			18,049
Pyrolyseöl Altreifen	-	-	-	*0,5 - 0,9	0,5 - 1*	37 - 41*
Pyrolyseöl (Hart-)Holzmix	56,4	6,2	37,1	0,2	0,01	17
MeOH-Gemisch	-	-	-	-	-	1,44
Destillationsrückstand	-	-	-	-	-	24 - 27

#### 4.1.2 Gasförmige Brennstoffe

Konkret stehen im Fokus der Untersuchungen Produktgase aus Fermentations- und Vergasungsprozessen, wie sie beispielweise bei der Behandlung von Biomassen oder Klärschlämmen entstehen. Im Rahmen der experimentellen Erprobung werden niederkalorische Brenngase mit Heizwerten im Bereich von 4 bis 14 MJ/kg eingesetzt. Die Gase werden für die experimentelle Erprobung aus den Hauptbestandteilen CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> synthetisch mit Hilfe einer Gasmischanlage hergestellt. Darüber hinaus werden mit einem Dampfgenerator und einer definierten Zugabe in das Brenngas die Einflüsse von Wasserdampfanteilen im Brenngas auf das Verbrennungs- und Schadstoffverhalten untersucht. In **Tabelle 4.3** sind die exemplarisch ausgewählten Brennstoffzusammensetzungen aufgeführt. Dazu zählen ein Biogas bestehend aus zu je 50 Vol.-% Methan und Kohlendioxid sowie eine exemplarisch ausgewählte Synthesegaszusammensetzung wie sie bei der Vergasung von Klärschlämmen auftreten kann. Spurengase wie NH<sub>3</sub>, HCN, H<sub>2</sub>S etc. bleiben nachfolgend sowohl in den numerischen als auch in den experimentellen Untersuchungen unberücksichtigt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Wasserdampfanteile werden anhand eines Gemisches bestehend aus Methan und Stickstoff untersucht, bei dem der Inertgasanteil schrittweise bis hin zu 45 Vol.-% durch Wasserdampf ersetzt wird.

**Tabelle 4.3: Zusammensetzungen der ausgewählten Brenngase.**

#	Bezeichnung	c(CH <sub>4</sub> ) /Vol.-%	c(CO <sub>2</sub> ) /Vol.-%	c(CO) /Vol.-%	c(H <sub>2</sub> ) /Vol.-%	c(H <sub>2</sub> O) /Vol.-%	c(N <sub>2</sub> ) /Vol.-%
a)	Biogas	50	50	-	-	-	-
b)	Synthesegas (Klärschlamm)	5	10	10	15	10	50
c1)	Schwachgas 0 Vol.-% H <sub>2</sub> O	25	-	-	-	0	75
c2)	Schwachgas 15 Vol.-% H <sub>2</sub> O	25	-	-	-	15	60
c3)	Schwachgas 30 Vol.-% H <sub>2</sub> O	25	-	-	-	30	45
c4)	Schwachgas 45 Vol.-% H <sub>2</sub> O	25	-	-	-	45	30

Die für die Gasgemische berechneten Zündverzugszeiten, adiabaten Flammentemperaturen, untere Heizwerte und Dichten in **Tabelle 4.4** aufgeführt.

**Tabelle 4.4: Eigenschaften der ausgewählten Brenngase.**

#	Bezeichnung	T <sub>ig</sub> <sup>(1)</sup> <sub>(λ=1,0)</sub> /ms	T <sub>ig</sub> <sup>(2)</sup> <sub>(λ=1,0)</sub> /ms	T <sub>ig</sub> <sup>(1)</sup> <sub>(λ=1,1)</sub> /ms	T <sub>ig</sub> <sup>(2)</sup> <sub>(λ=1,1)</sub> /ms	T <sub>adibat</sub> /°C	H <sub>u</sub> /kWh·m <sub>N</sub> <sup>-3</sup>	H <sub>u</sub> /MJ·kg <sup>-1</sup>	ρ /kg·m <sub>N</sub> <sup>-3</sup>
a)	Biogas	410,8	346,9	433,2	368,8	1.832	4,99	13,32	1,35
b)	Synthesegas (Klärschlamm)	1,2	1,1	1,3	1,2	1.488	1,30	4,34	1,08
c1)	Schwachgas 0 Vol.-% H <sub>2</sub> O	484,6	409,3	500,0	441,4	1.682	2,49	8,03	1,12
c2)	Schwachgas 15 Vol.-% H <sub>2</sub> O	481,9	409,3	500,0	441,4	1.665	2,49	8,55	1,05
c3)	Schwachgas 30 Vol.-% H <sub>2</sub> O	479,1	409,3	500,0	441,4	1.648	2,49	9,13	0,98
c4)	Schwachgas 45 Vol.-% H <sub>2</sub> O	476,3	409,3	500,0	441,4	1.631	2,49	9,79	0,92

(1) Curran et al.

(2) GRI-Mech 3.0

In der ausgewählten Brennstoffmatrix besitzt das Biogas die höchsten Werte für den Heizwert, die adiabate Verbrennungstemperatur und die Zündverzugszeit, das Synthesegas die jeweils niedrigsten. Der Heizwert des Schwachgases liegt mit  $2,49 \text{ kWh/m}_N^3$  zwischen dem des Biogas- und Synthesegasgemisches.

## 4.2 Experimentelle Charakterisierung der Flüssigbrennstoffe

Die Charakterisierung der Brennstoffe erfolgt über verschiedene Methoden. Für die Brennstoffe werden die Dichte und die Viskosität über der Temperatur bestimmt. Insbesondere die Viskosität hat einen großen Einfluss auf die Zerstäubung eines Brennstoffes in dem Prozess der Gemischbildung. Des Weiteren erfolgt eine Charakterisierung des Ablagerungsverhaltens in einer idealisierten Prüfapparatur, die dem Prinzip der Tropfenverdampfung folgt. Aus der Korrelation der Menge gebildeter Ablagerungen mit der Verdampfungstemperatur, lassen sich Rückschlüsse auf die in der Gemischbildungszone erforderlichen Temperaturen ziehen, um die Brennstoffe vollständig in die Gasphase zu überführen.

### 4.2.1 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

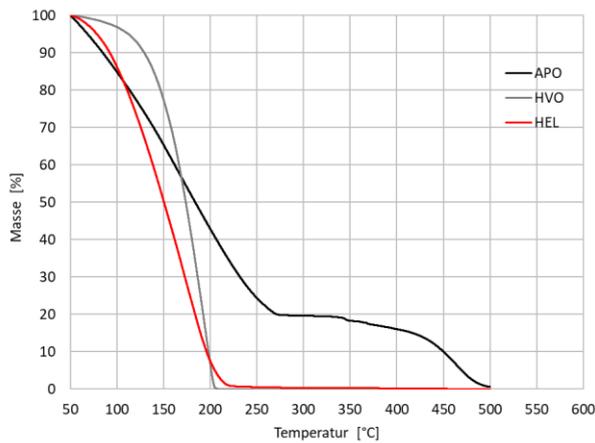
In der thermogravimetrischen Analyse wird eine feste oder flüssige Probe in einem kleinen Tiegel aus hitzebeständigem Material (z. B. Aluminium für Messungen  $< 600 \text{ }^\circ\text{C}$  oder Quarz für Messungen  $> 600 \text{ }^\circ\text{C}$ , siehe **Abbildung 4.2**) in einem Ofen erhitzt, und die Masse bzw. die Massenänderung der Probe in Abhängigkeit der Temperatur und/oder der Zeit gemessen. Der Probenhalter ist an eine Mikrowaage gekoppelt, welche die Masseänderungen während des Aufheizvorgangs registriert. Ein Thermoelement nahe dem Tiegel misst die Temperatur. Heizrate, Endtemperatur, und Spülgasvolumenstrom sind voreingestellte Parameter. Für die hier durchgeführten Analysen wurde ein Temperaturbereich von  $50 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , mit einer Heizrate von  $2 \text{ K/min}$  eingestellt. Der Ofen wurde während den Messungen wahlweisen mit Stickstoff oder Sauerstoff und einem Volumenstrom von  $25 \text{ ml/min}$  gespült.



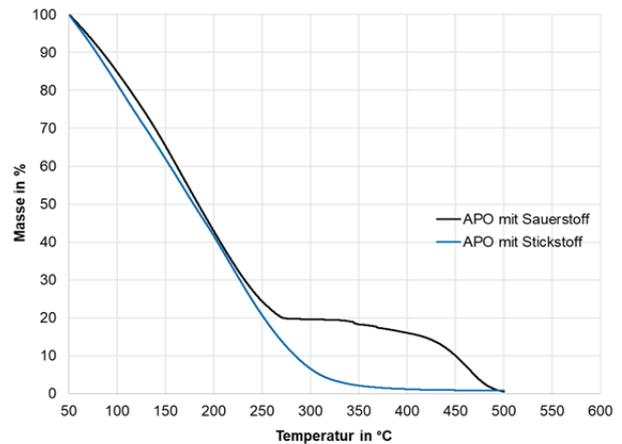
Abbildung 4.2: TGA mit geöffnetem Ofen (links), Aluminiumtiegel ( $100 \mu\text{L}$ , rechts). (Quelle: OWI)

Die **Abbildung 4.3** zeigt den Masseverlust im Tiegel über der Temperatur für Altreifenpyrolyseöl für eine Aufheizrate von  $2 \text{ K/min}$  für die Verdunstung in Sauerstoff. Als Referenz sind die Brennstoffe HEL und HVO aufgetragen. Es fällt auf, dass der Brennstoff APO nicht kontinuierlich verdunstet. Bis zu einer Temperatur von  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  nimmt die Probenmasse um ca.  $80 \%$  ab. Bei der Verdunstung in Sauerstoff sinkt die Verdampfungsrates gegen  $0 \%$  und steigt erst mit der Temperatur wieder an. Am Ende der Messung ( $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) bleibt

noch etwas Probenmasse zurück. Im Vergleich dazu, nähert sich die Verdunstungsrate für die Verdunstung in Stickstoff kontinuierlich 0 % an, siehe **Abbildung 4.4**. Es wird vermutet, dass ab einer Temperatur von 250 °C Oxidationsreaktionen einsetzen und Produkte entstehen, die erst bei wesentlich höheren Temperaturen in die Gasphase übergehen.

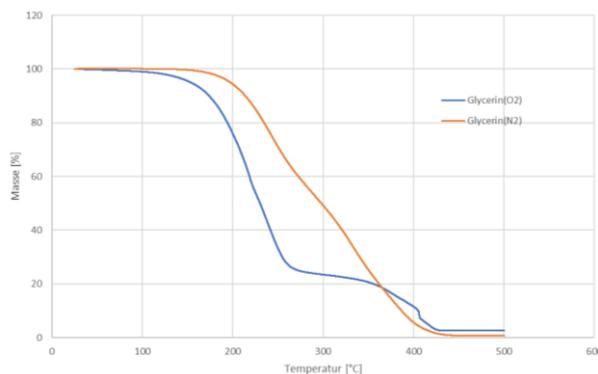


**Abbildung 4.3:** Probenmasse über der Tiegeltemperatur. Verdunstung von Altreifenpyrolyseöl in O<sub>2</sub>. (Quelle: OWI)

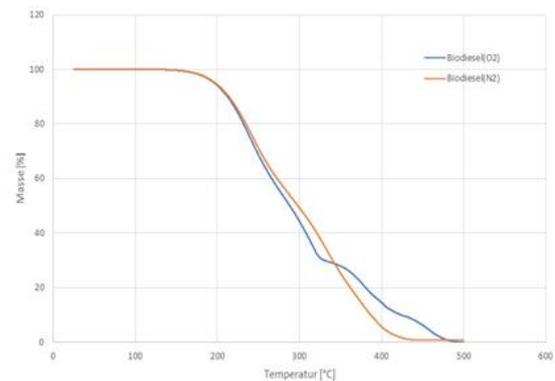


**Abbildung 4.4:** Probenmasse über der Tiegeltemperatur. Verdunstung von Altreifenpyrolyseöl in O<sub>2</sub> im Vergleich zur Verdunstung in N<sub>2</sub>. (Quelle: OWI)

In **Abbildung 4.5** ist der Masseverlust im Tiegel über der Temperatur für eine Aufheizrate von 2 K/min für die Verdunstung von Glycerin in Sauerstoff als auch für die Verdunstung in Stickstoff aufgetragen. Bis zu einer Temperatur von 250 °C nimmt die Probenmasse um ca. 70 % ab. Bei der Verdunstung in Sauerstoff sinkt die Verdampfungsrate und steigt erst ab 400 °C wieder an. Am Ende der Messung (500 °C) bleiben noch 4,6 % der Probenmasse zurück. Im Vergleich dazu, bleibt die Verdunstungsrate für die Verdunstung in Stickstoff nahezu konstant. Es verbleiben ab einer Temperatur von 450 °C 2,6 % der Probenmasse. Quantitativ hat die Verdunstung von UCOME B-Ware den gleichen Verlauf, vgl. **Abbildung 4.6**.



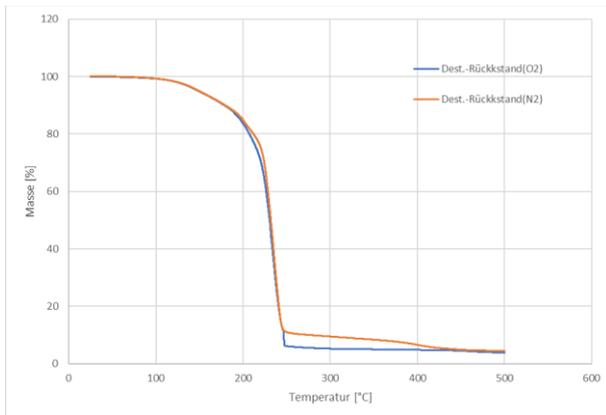
**Abbildung 4.5:** Probenmasse über der Tiegeltemperatur. Verdunstung von Glycerin in O<sub>2</sub> im Vergleich zur Verdunstung in N<sub>2</sub>. (Quelle: OWI)



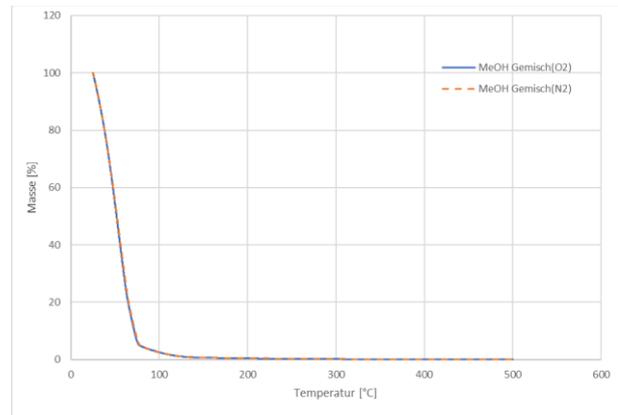
**Abbildung 4.6:** Probenmasse über der Tiegeltemperatur. Verdunstung von UCOME B-Ware in O<sub>2</sub> im Vergleich zur Verdunstung in N<sub>2</sub>. (Quelle: OWI)

In **Abbildung 4.7** ist der Masseverlust im Tiegel über der Temperatur für eine Aufheizrate von 2 K/min für die Verdunstung eines Destillationsrückstands in Sauerstoff als auch für die Verdunstung in Stickstoff aufgetragen. Bis zu einer Temperatur von 250 °C ist der Verlauf der Massenabnahme in beiden Spülgasen deckungsgleich. Bei der Verdunstung in Sauerstoff sinkt die Probenmasse bis 250 °C auf 5 % und im weiteren Verlauf noch auf 3,8 % der Ausgangsmasse ab. Bei der Verdunstung in Stickstoff sinkt die

Probenmasse bis 250 °C auf 11 %, bis 450 °C auf und im weiteren Verlauf noch auf 4,5 % der Ausgangsmasse ab. Der Unterschied im Verlauf der Massenabnahme deutet auf Kohlenwasserstoffe hin, die erst bis zu einer Temperatur von 450 °C in die Gasphase übergehen und bei Überspülen mit Sauerstoff bereits bei 250 °C oxidiert werden. Da der Brennstoff Aschebildner enthält, bleiben diese im Tiegel zurück. Das Methanol- Kohlenwasserstoffgemisch verdunstet bereits bei Starttemperatur. Bereits bei 185 °C ist die Probenmasse sowohl bei Überspülen mit Sauerstoff als auch mit Stickstoff vollständig in die Gasphase übergegangen, siehe **Abbildung 4.8**.

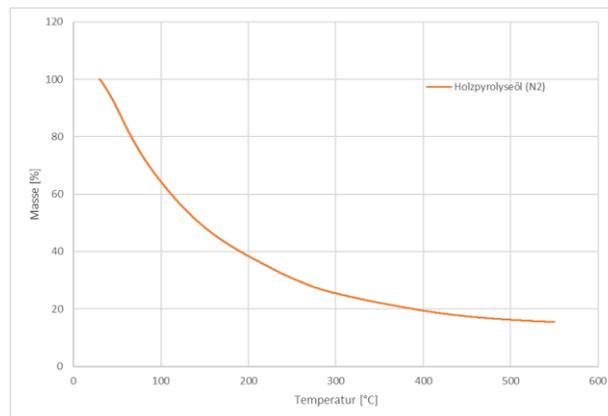


**Abbildung 4.7:** Probenmasse über der Tiegeltemperatur. Verdunstung eines Destillationsrückstands in O<sub>2</sub> im Vergleich zur Verdunstung in N<sub>2</sub>. (Quelle: OWI)



**Abbildung 4.8:** Probenmasse über der Tiegeltemperatur. Verdunstung eines Methanol - Kohlenwasserstoffgemisches in O<sub>2</sub> im Vergleich zur Verdunstung in N<sub>2</sub>. (Quelle: OWI)

In **Abbildung 4.9** ist der Masseverlust im Tiegel über der Temperatur für eine Aufheizrate von 2 K/min für die Verdunstung eines Destillationsrückstands in Stickstoff aufgetragen. Bis zu einer Temperatur von 550 °C verbleiben noch 15,5 % der Probenmasse im Tiegel. Das ist mehr als der Anteil der Aschebildner im Brennstoff. Für eine vollständige Verdunstung muss eine höhere Endtemperatur erreicht werden, was mit der verwendeten TGA nicht darstellbar ist. Bei Überspülen der Probe mit Sauerstoff wurde eine Zündung des Brennstoffes erwartet und auf eine vergleichende Messung verzichtet.



**Abbildung 4.9:** Probenmasse über der Tiegeltemperatur. Verdunstung eines Destillationsrückstands in O<sub>2</sub> im Vergleich zur Verdunstung in N<sub>2</sub>. (Quelle: OWI)

In der real umgesetzten Gemischbildung kann eine Reduktion des Sauerstoffpartialdrucks durch eine Verdunstung in rezirkuliertem Abgas erfolgen. Crackprodukte sind schlecht oder gar nicht mehr in die Gasphase zu überführen. Es besteht die Gefahr, dass sie die Zone der Verbrennung durchschreiten und

stromab der Flammenfront in einer Diffusionsflamme verbrennen, was i. d. R. zu hohen Schadstoffemissionen führt.

### Tiegelverdampfer

Für die Versuche zur Ablagerungsbildung der verschiedenen Brennstoffe, wurde ein Tiegelverdampfer verwendet. Ein Tiegel ist ein metallischer Probenkörper, auf den eine begrenzte Menge des zu testenden Brennstoffs in regelmäßigen Abständen getropft wird (**Abbildung 4.10**). Die oberflächennahe Messung der Temperatur, ist durch eine eingebrachte Bohrung über ein Thermoelement am Tiegel möglich.



*Abbildung 4.10: Probenkörper des Tiegelverdampfers. (Quelle: OWI)*

Den Aufbau der Versuchsanordnung zeigt **Abbildung 4.11**. Im Tiegelverdampfer befindet sich ein Tiegel in einem Heizblock. Der Tiegel kann bis zu 550 °C konstant aufgeheizt werden. Aus einer 100 ml Vollpipette, die gleichzeitig als Vorratsbehälter dient, wird der Brennstoff im laufenden Versuch über eine Kraftstoffpumpe (Kolbendosierpumpe) und eine Kapillare in den Verdampferraum gefördert und dort mittig auf die Oberfläche des Tiegels getropft. Die Taktung der Pumpe erfolgt in 10 s-Schritten. Die Pipette ist am unteren Ende mit einer Lichtschranke versehen. Diese beendet bei einer Unterschreitung des Füllstandes den Versuchsdurchlauf und gewährleistet, dass bei jedem Durchlauf die gleiche Brennstoffmenge verdampft wird. Alle Heizungen werden ebenfalls abgeschaltet. Der Verdampferraum wird weiter mit Gas gespült. Durch die zügige Temperaturabsenkung werden unerwünschte Nachreaktionen vermieden, bzw. um zu verhindern, dass der thermische Abbau der Ablagerungen die Ursache dafür ist, dass für Temperaturen oberhalb von 400 °C keine Ablagerungen beobachtet werden. Während der Durchführung des Versuchs strömt Spülgas über den Tiegel. Die Einstellung des Gasstroms erfolgt über einen Massendurchflussregler. Aus am OWI durchgeführten Parameterstudien ist bekannt, dass ein zündungsfreier Versuchsbetrieb für den Brennstoff HEL mit Spülgasvolumenströmen > 12 l/min möglich ist. Für die hier durchgeführten Arbeiten wurde der Spülgasvolumenstrom auf 15 l/min festgelegt. Im Allgemeinen können verschiedene Gase eingeleitet werden. In dieser Arbeit wurde der Tiegelverdampfer mit Druckluft und mit Stickstoff betrieben. Der Gasstrom wird in einem Ring mit Bohrungen erwärmt und strömt dort in den Verdampferraum, siehe **Abbildung 4.12**. Das Dampf-Luft-Gemisch strömt über ein Rohr zu einem Abflammer damit keine schädlichen Emissionen in die Atmosphäre gelangen. Die Ablagerungsmengen werden mit einer Differenzmessung des Tiegels vor und nach einem Versuch gravimetrisch bestimmt.

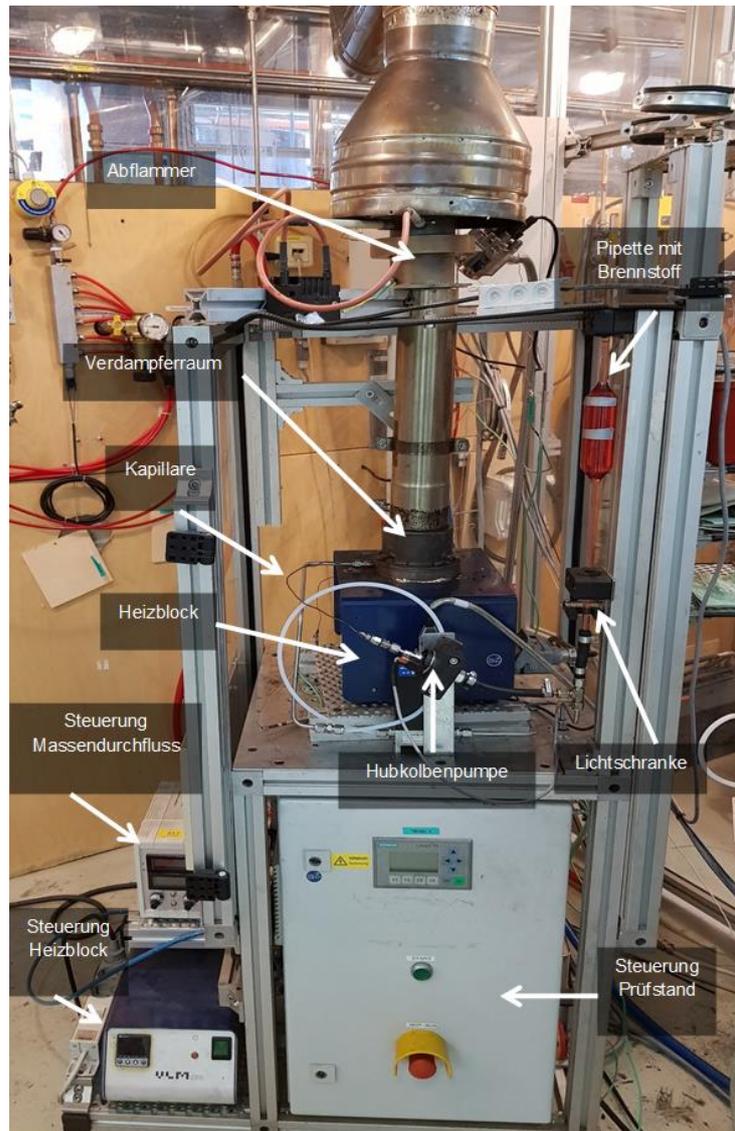


Abbildung 4.11: Versuchsapparatur zur Brennstoffverdampfung. (Quelle: OWI)

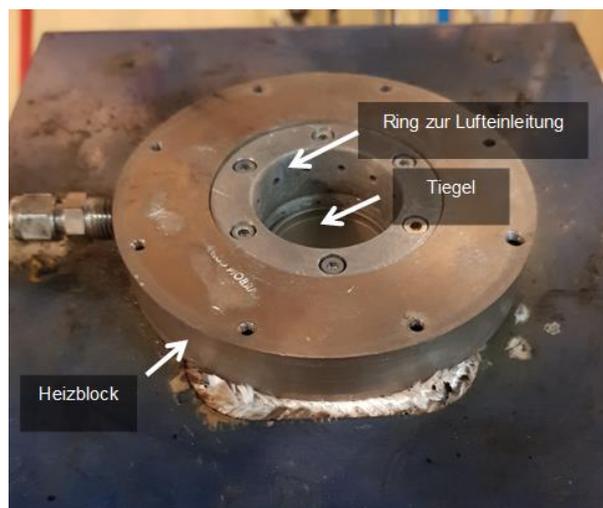


Abbildung 4.12: Ring zur Gaseinleitung über dem Probekörper. (Quelle: OWI)

Die **Abbildung 4.13** zeigt die Ablagerungsbildung eines HEL für 300 °C bis 400 °C Tiegeltemperatur unter Verwendung von Luft als Spülgas. Ab 350 °C Tiegeltemperatur ist visuell nur noch ein Fleck auf der Tiegeloberfläche zu erkennen. Die Massendifferenz des Tiegels vor und nach dem Versuch betrug bei 300 °C 0,8 g pro 100 ml Brennstoff und bei 350 °C 0,2 g pro 100 ml Brennstoff. Bei 450 °C unterschreitet die Massendifferenz die Genauigkeit der verwendeten Analysenwaage.



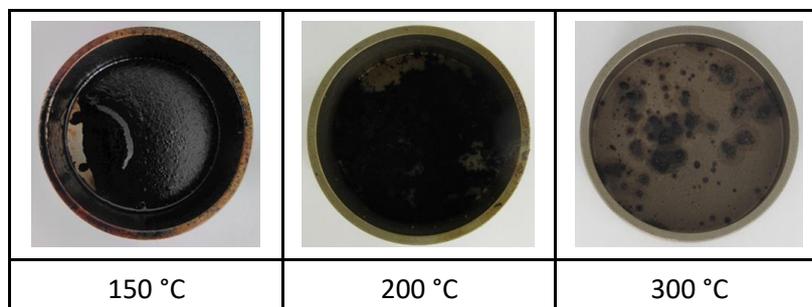
*Abbildung 4.13: Rückstand aus der Verdampfung von Heizöl extra leicht (HEL) für verschiedene Temperaturen. (Quelle: OWI)*

Bei der Verdampfung von HVO betrug die Massenzunahme des Tiegels bei einer Verdampfungstemperatur von 200 °C 0,03 g pro 100 ml Brennstoff. Mit Erhöhung der Tiegeltemperatur konnte keine Massenzunahme mehr festgestellt werden obwohl auch hier Flecken auf der Tiegeloberfläche sichtbar waren, siehe **Abbildung 4.14**.



*Abbildung 4.14: Rückstand aus der Verdampfung von hydriertem Pflanzenöl (HVO) für verschiedene Temperaturen. (Quelle: OWI)*

Die **Abbildung 4.15** zeigt die abnehmenden Ablagerungsmengen für zunehmende Oberflächentemperaturen für die Brennstoffe MeOH-Gemisch (oben) und UCOME B-Ware (Mitte) und Glycerin (unten).



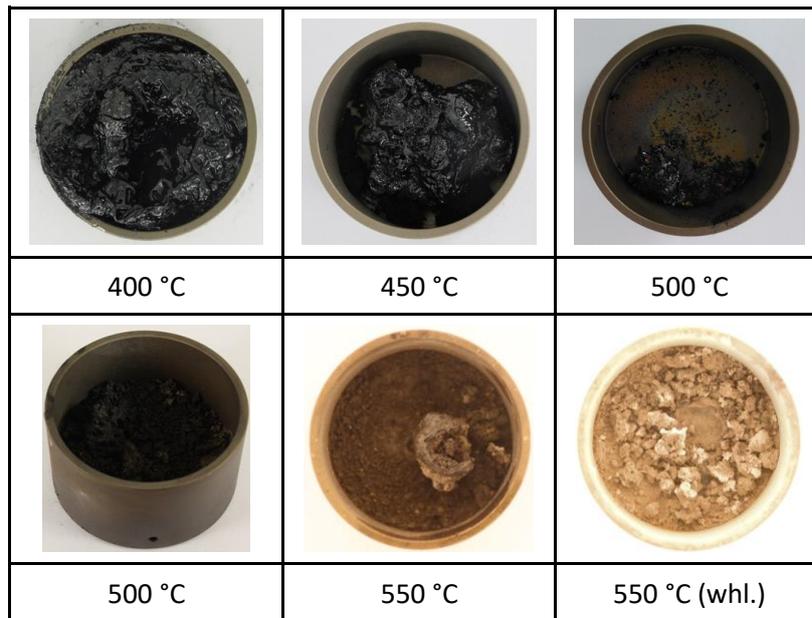


Abbildung 4.15: Rückstand aus der Verdampfung eines MeOH- Gemisches (oben), UCOME B-Ware (Mitte) und von Glycerin (unten,) für verschiedene Temperaturen. (Quelle: OWI)

Für eine vollständige Verdunstung müssen für den Brennstoff UCOME B-Ware und Glycerin in der Zone der Gemischbildung wesentlich höhere Temperaturen erreicht werden als für den Brennstoff MeOH-Gemisch. In **Abbildung 4.16** sind für den Brennstoff Altreifenpyrolyseöl Ablagerungsmengen über der Tiegeltemperatur aufgetragen. Bei Temperaturen unter 500 °C sind die Ablagerungsmengen für die Verdampfung in Stickstoff gegenüber der Verdampfung in Luft deutlich reduziert.

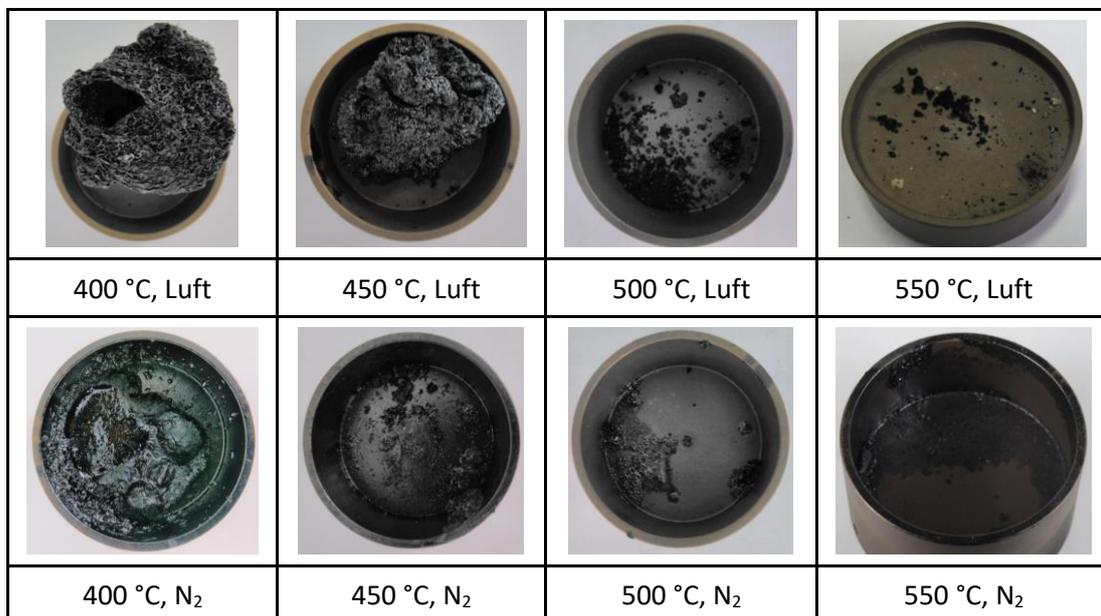
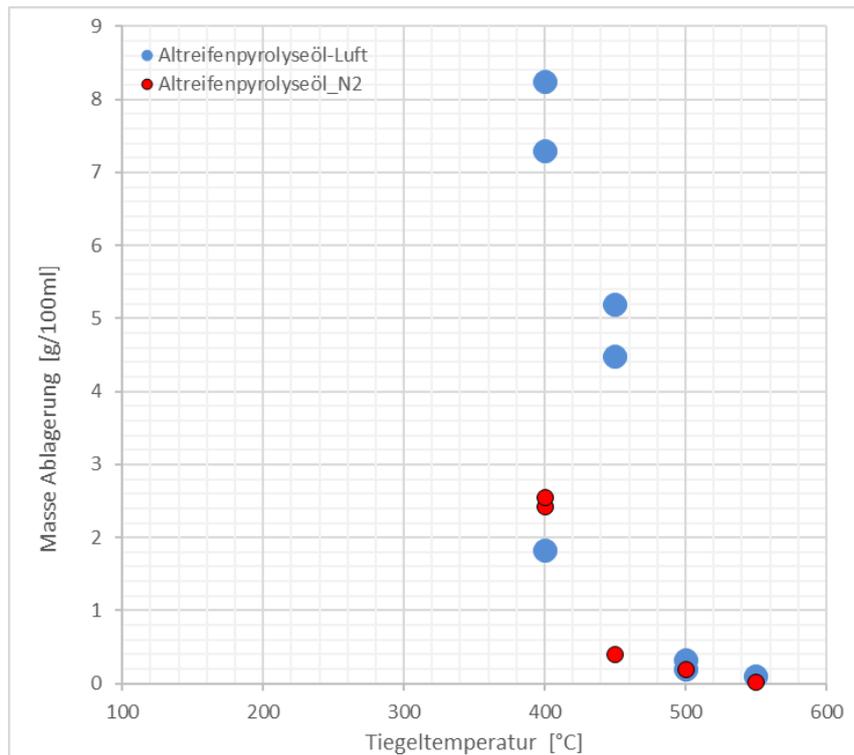


Abbildung 4.16: Rückstand aus der Verdampfung von Altreifenpyrolyseöl für verschiedene Temperaturen. Verdunstung in Luft im Vergleich zur Verdunstung in Stickstoff. (Quelle: OWI)

Nicht nur das Volumen, auch die Massen sind reduziert. In **Abbildung 4.17** sind die Ablagerungsmassen für den Brennstoff Altreifenpyrolyseöl über der Tiegeltemperatur aufgetragen. Bis auf einen Ausreißer bei

400 °C Tiegeltemperatur liegt die Ablagerungsmasse unter 500 °C bei Verdampfung in Luft deutlich über der bei Verdampfung in Stickstoff.



*Abbildung 4.17: Ablagerungsmengen von Altreifenpyrolyseöl über der Tiegeltemperatur. Verdunstung in Luft im Vergleich zur Verdunstung in Stickstoff. (Quelle: OWI)*

Die Methode der Tiegelverdampfung ist für die Untersuchung von Brennstoff-Blends aus HEL und FAME entwickelt worden. Im Laufe der Versuche mit anderen Brennstoffen traten Probleme mit der Brennstoffförderung und -dosierung auf. Diese konnten für die Brennstoffe Holzpyrolyseöl und Destillationsrückstand nicht befriedigend gelöst werden. Eine eindeutige und reproduzierbare Unterscheidung der Brennstoffe in Bezug auf die Ablagerungsneigung liefert die Prüfmethode des Tiegelverdampfers bei Temperaturen < 500 °C. Alle Brennstoffe zeigen im Bereich von 150 °C bis 550 °C eine Zunahme der gebildeten Ablagerungsmasse mit abnehmender Temperatur. Mit einer Verdampfung in einer inerten Atmosphäre kann die Bildung von Crackprodukten im Bereich niedrigerer Temperaturen gemindert werden.

#### 4.2.2 Dichte und Viskosität

Die **Abbildung 4.18** und **Abbildung 4.19** stellen für die zur Verfügung gestellten Brennstoffe die nach DIN EN ISO 12185 :1997 bestimmte Dichte und die nach ASTM D 7042 :2020 bestimmte dynamische Viskosität dar.

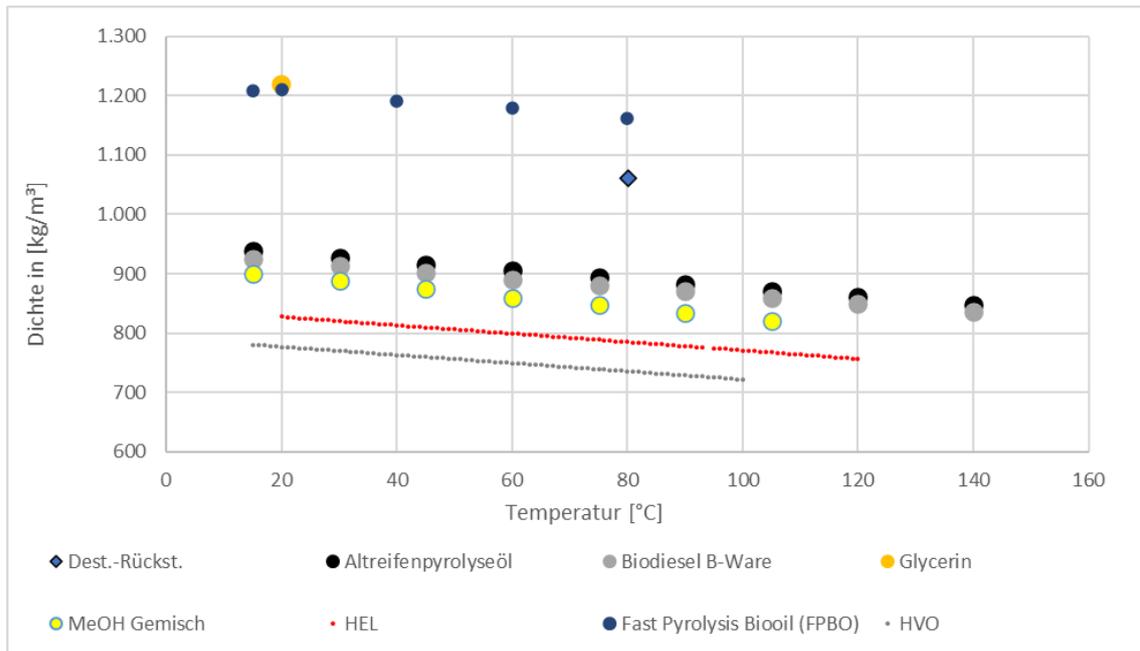


Abbildung 4.18: Dichte der Brennstoffe über Temperatur. (Quelle: OWI)

Alle fünf gemessenen Brennstoffe weisen ein typisches Verhalten bei der Dichtemessung auf. Die Dichte sinkt linear mit steigender Temperatur. Für die Brennstoffe Glycerin und FPBO ist das verwendete Messgerät nicht geeignet.

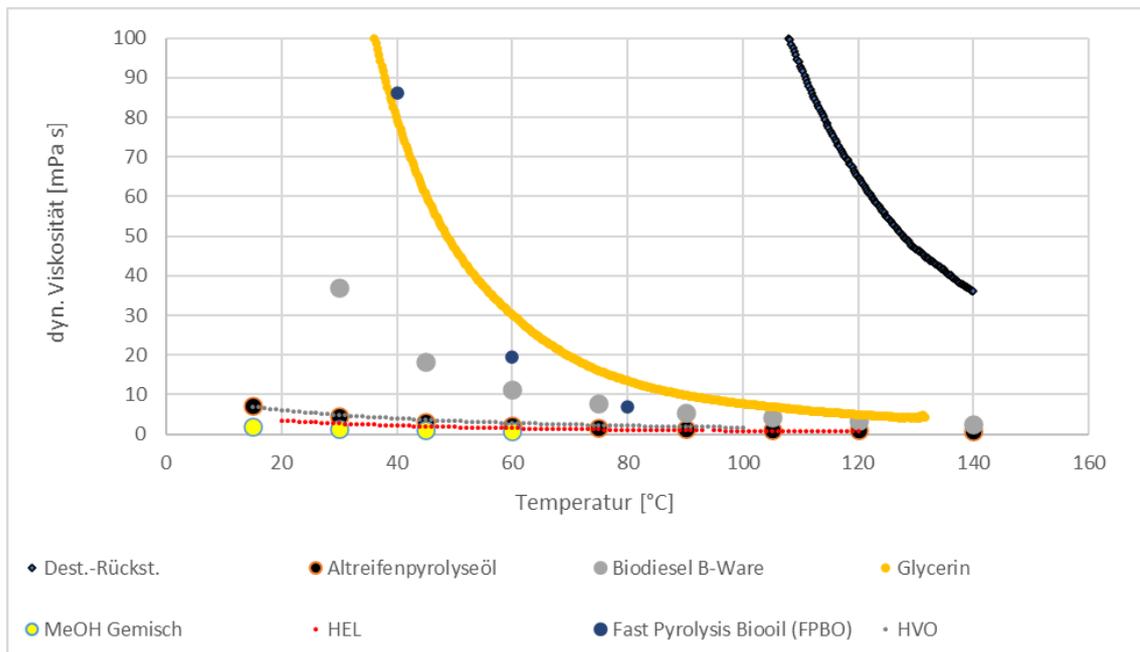


Abbildung 4.19: Dynamische Viskosität der Brennstoffe über der Temperatur. (Quelle: OWI)

Für den Brennstoff MeOH-Gemisch kann die Viskosität nur bis zu einer Temperatur von 60 °C bestimmt werden, da bei höheren Temperaturen einsetzender Siedebeginn die Messung verfälscht. Der Destillationsrückstand ist bei Raumtemperatur fest und geht erst bei Temperaturen > 40 °C in den flüssigen Zustand über. Der max. Temperaturbereich des Analysegerätes endet bei 140 °C. Bei dieser Temperatur

beträgt die dynamische Viskosität 35 mPa·s. Sie kann nicht weiter gesenkt werden, da mit weiterer Temperaturerhöhung Crackreaktionen einsetzen.

#### 4.2.3 Untersuchung der Partikelbildung aus der Verbrennung

Am OWI wurden Vorversuche zu den Verbrennungseigenschaften der Flüssigbrennstoffe in einem Prüfflammrohr mit einem modifizierten Ölbrenner aufgebaut. Ein mit Standard-Brennerkomponenten aufgebauter, leicht modifizierter Brenner konnte über eine Zeit von einigen Stunden mit Altreifenpyrolyseöl bzw. einem Blend aus 20 %<sub>wt.</sub> Ethanol und 80 %<sub>wt.</sub> Holzpyrolyseöl betrieben werden, bevor es durch Ablagerungsbildung im Brennstoffpfad zu Pumpenausfall oder Belegung von Filtern, des Ölvorwärmers oder der Brennstoffdüse kam. Um eine quantitative Ermittlung der Größenverteilung von Feinstaubemissionen zu erbringen, wurden Messungen mit einem 14-stufigen Niederdruck-Kaskadenimpaktor mit Fraktionierungsstufen zwischen ca. 0,016 µm und 10 µm ausgeführt. Die **Abbildung 4.20** und **Abbildung 4.21** zeigen die Emissionen für einen stationären Betriebspunkt. Die Partikelemissionen sind auf das feuchte Abgas bezogen aufgetragen über die einzelnen Abscheidedurchmesser der Kaskadenstufen. Die gasförmigen Emissionen sind auf das trockene Abgas bezogen. Bei der Verbrennung von HEL und HVO sind die gemessenen Beladungen auf vielen Kaskaden sehr gering, siehe **Abbildung 4.20**, (< 0,01 mg) und daher potenziell mit hohen Messfehlern behaftet.

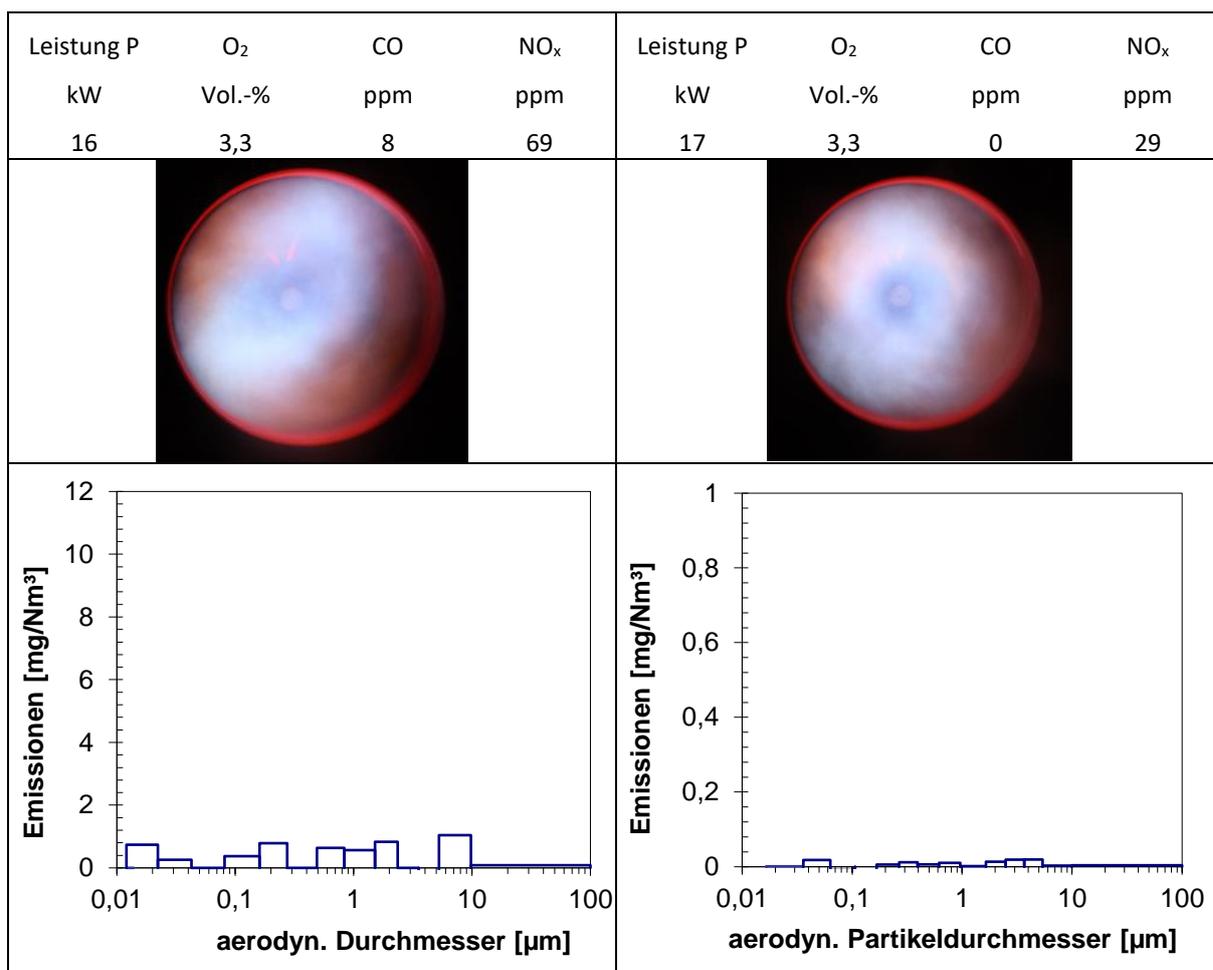


Abbildung 4.20: Emissionen, HEL (links) und HVO (rechts). (Quelle: OWI)

Eine Abschätzung des relativen Fehlers beim Wiegen der Substratplatten beläuft sich auf eine Messtoleranz von etwa 0,004 mg, was bei den vorliegenden Beladungen relativen Fehlern von etwa 25 % entspricht. Damit liegen die Messungen für HEL und HVO innerhalb der Nachweisgrenze. Übliche Größenaufteilungen der Partikelfractionen erfolgen in die Größenklassen PM 10, PM 2.5 und PM 1 (Teilchen mit aerodynamischem Durchmesser < 10, 2,5 und 1 µm). Durch Summation der Beladung mehrerer Kaskaden des Impaktors erhält man Abschätzungen für die Größenklassenanteile. Es ergeben sich die folgenden Konzentrationen:

HEL:  $PM_{10} = 1,3 \text{ mg/m}^3_N$ ,  $PM_{2.5} = 1 \text{ mg/m}^3_N$  und  $PM_1 = 0,85 \text{ mg/m}^3_N$

HVO:  $PM_{10} = 0,022 \text{ mg/m}^3_N$ ,  $PM_{2.5} = 0,014 \text{ mg/m}^3_N$  und  $PM_1 = 0,01 \text{ mg/m}^3_N$

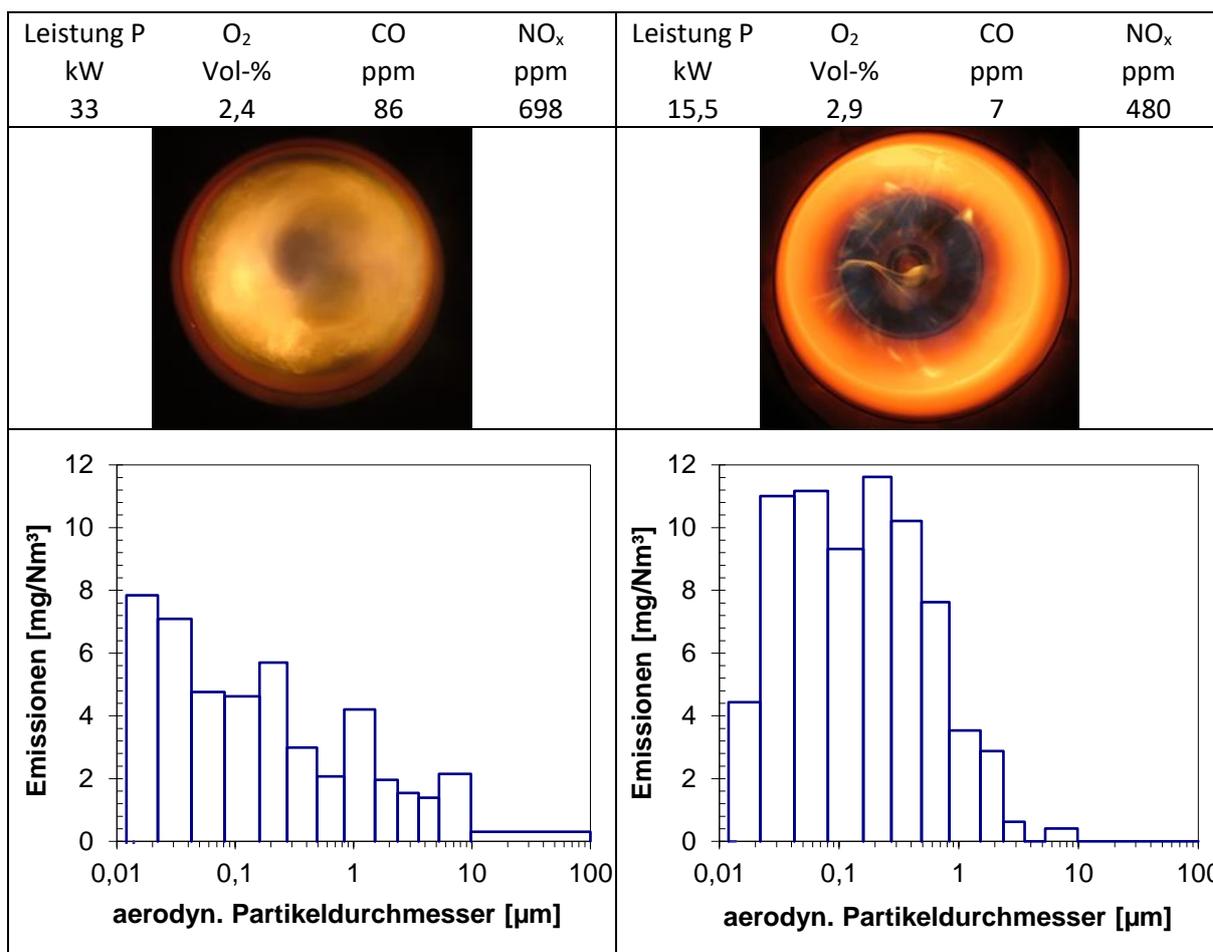


Abbildung 4.21: Emissionen, Altreifenpyrolyseöl (APO, links) und Holzpyrolyseöl (FPBO, rechts). (Quelle: OWI)

Das Aufwachsen einer Ascheschicht im Brennraum konnte nicht beobachtet werden. Die bei der Verbrennung entstehenden Aschen werden mit dem Abgas ausgetragen. Bei den Brennstoffen APO und FPBO haben die sehr feinen Partikel den höchsten Massenanteil an den Emissionen.

Altreifenpyrolyseöl:  $PM_{10} = 12,7 \text{ mg/m}^3_N$ ,  $PM_{2.5} = 11,9 \text{ mg/m}^3_N$  und  $PM_1 = 11,2 \text{ mg/m}^3_N$

Holzpyrolyseöl:  $PM_{10} = 19,1 \text{ mg/m}^3_N$ ,  $PM_{2.5} = 18,1 \text{ mg/m}^3_N$  und  $PM_1 = 17,4 \text{ mg/m}^3_N$

Für den Brennstoff Altreifenpyrolyseöl wurde der Einfluss der Verbrennungsführung auf die Feinstaubemissionen untersucht. Durch eine Reduktion der Leistung und Erhöhung des Dralls der Verbrennungsluft

ändert sich die Strömung im Flammrohr. Die Reaktionszone der Flamme legt sich an die Flammrohrwand an. In der Mitte der Flamme bildet sich ein Rückstromgebiet, in das heißes Abgas in die Zone der Gemischbildung rezirkuliert wird. Die Flamme brennt dadurch zunehmend vorgemischt, was an einer bläulichen Färbung zu erkennen ist. Durch den Anteil an im Brennstoff gebundenem Stickstoff sinken die  $\text{NO}_x$ -Emissionen nur geringfügig. Die CO- und Partikelemissionen sinken wie in **Abbildung 4.22** deutlich.

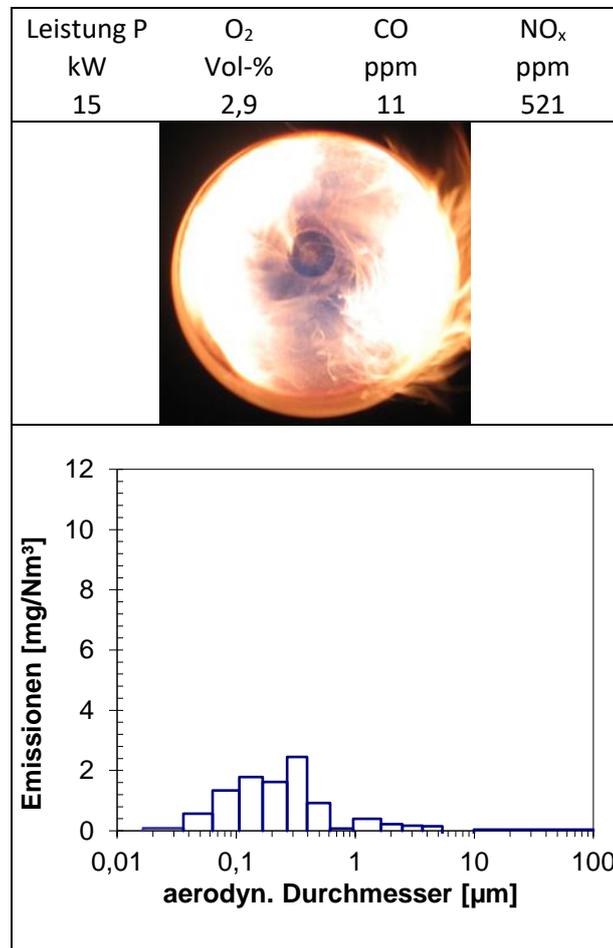


Abbildung 4.22: Emissionen nach Optimierung, Altreifenpyrolyseöl (APO). (Quelle: OWI)

Von den Brennstoffen Glycerin, UCOME B-Ware, MeOH-Gemisch standen für Verbrennungsversuche in zu geringen Mengen zur Verfügung. Die Ergebnisse aus der TGA und den Versuchen mit dem Tiegelverdampfer lassen keine besonderen Herausforderungen bei deren Verbrennung erwarten.

Für den Brennstoff Destillationsrückstand wurden Pumpversuche mit einer Zahnradpumpe für Schweröl und einer Kreiselpumpe durchgeführt. Mit keiner der getesteten Pumpen konnte der zur Senkung der Viskosität auf 140 °C erwärmte Brennstoff gegen für eine gute Zerstäubung mit einer Druckzerstäuberdüse notwendigen Druck > 10 bar gefördert werden. Aus geringfügigen Temperatursenken in der Pumpe resultiert ein steiler Anstieg der Brennstoffviskosität und damit einhergehend des Drehmomentbedarfes, was in einem blockieren der Pumpe endet. In Vorversuchen zur Zerstäubung des Destillationsrückstands mit einer außen mischenden Zweistoffdüse, konnte eine nach optischer Begutachtung ausreichende Zerstäubungsqualität dargestellt werden. Bei Verbrennungsversuchen an einem nicht-vormischenden Brenner mit Zweistoffdüsen traten Probleme bei der Brennstoffförderung auf. Trotz der Maßnahmen zur

Vergleichmäßigung des Brennstoffvolumenstroms konnte kein dauerhaft zufriedenstellender Betrieb mit niedrigen Emissionen dargestellt werden. In einem kurzzeitigen Betriebspunkt konnten mit Erdgas-Stützfeuerung die in **Tabelle 4.5** aufgeführten Emissionen mit einem Rauchgasmessgerät (Testo 335) aufgenommen werden.

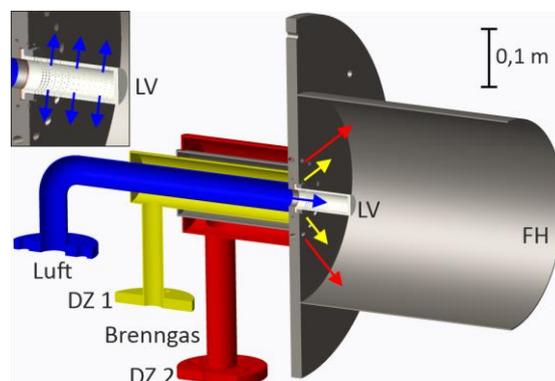
*Tabelle 4.5: Abgasemissionen bei Co-Verbrennung mit Erdgas. (Quelle: OWI)*

Bestandteil	Einheit	Wert
O <sub>2</sub>	Vol.-%	3
CO <sub>2</sub>	Vol.-%	-
CO	ppm	20
NO	ppm	34
NO <sub>x</sub>	ppm	36

Der Brennstoff enthält die Aschebildner Ca 2 %<sub>wt.</sub> – 3 %<sub>wt.</sub>, Mg 2 %<sub>wt.</sub>, Si 0,2 %<sub>wt.</sub>, Fe 1 %<sub>wt.</sub>, Al 0,1 %<sub>wt.</sub>. Die bei der Verbrennung entstandene Asche hat sich als staubförmiger, rehbrauner Belag in der Brennkammer und den Rauchgaszügen niedergeschlagen. Sie konnte mit einem Staubsauger oder Handfeger rückstandsfrei von den Oberflächen entfernt werden. Um weitere Emissionsmessungen durchführen zu können, ist ein störungsfreier Brennerbetrieb über min. 3 Stunden notwendig. Dieser konnte nicht erreicht werden.

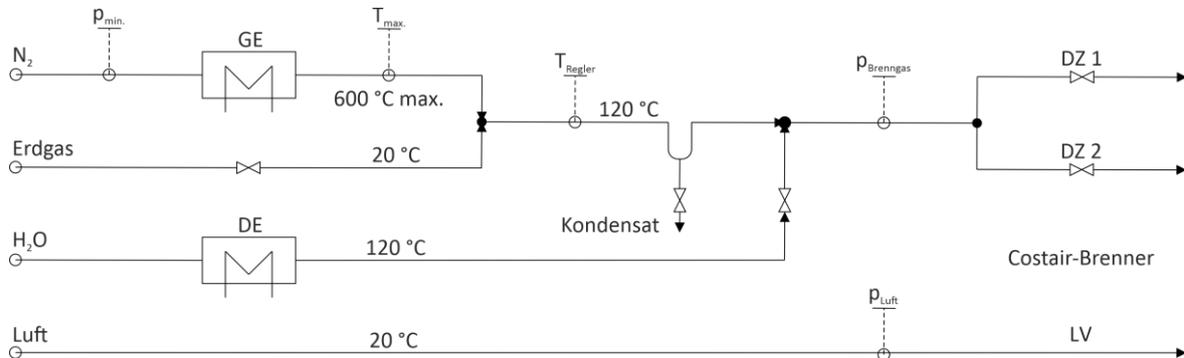
### 4.3 Verbrennung von wasserhaltigen schwachkalorischen Brenngasen

Die Verbrennung von schwachkalorischen Brenngasen mit hohen Wasseranteilen wurde experimentell untersucht. Für die Untersuchungen wurde ein bestehender 100 kW COSTAIR-Brenner [3] eingesetzt, um die grundsätzliche Eignung des Verbrennungskonzeptes für den Einsatz von regenerativen Brennstoffen der 2. und 3. Generation zu beurteilen. Den prinzipiellen Aufbau des Brenners zeigt **Abbildung 4.23**. Der Brenner besteht aus einer zentralen Luftverteilerdüse, umgeben von jeweils 16 auf zwei Bohringkreisen verteilten, um den Luftverteiler angeordneten, Brennstoffdüsen mit 3 bzw. 8 mm Bohrungsdurchmesser, die wahlweise oder gemeinsam in Abhängigkeit vom verwendeten Brennstoff und des benötigten Leistungsbereiches beaufschlagt werden können. Durch einen Bohrungswinkel von 45° wird der Brennstoffströmung Drall aufgeprägt, der eine ausgeprägte Strömungsrezirkulation bewirkt. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurde das Brenngas über die 3 mm Düsen zugeführt (in **Abbildung 4.23** gelb markiert), die 8 mm Düsen wurden in den Versuchen optional, für den Fall zu hoher Leitungsdrücke vorbehalten, die außerhalb des Betriebsbereiches der verwendeten Gasmassendurchflussregler liegen.



*Abbildung 4.23: Schnittansicht des 100 kW COSTAIR-Brenners (FH: Flammenhalter, DZ: Drallerzeuger, LV: Luftverteiler) [3].*

Für die Feuerungsversuche wurde ein experimenteller Aufbau realisiert, der die gezielte Zudosierung von Wasserdampf in das Brenngas ermöglicht. Exemplarisch wurde als schwachkalorisches Gas ein synthetisch hergestelltes Gemisch aus 25 Vol.-% Methan bzw. Erdgas (H-Qualität, 91,7 Vol.-% Methan-Anteil) und 75 Vol.-% Stickstoff (technisch) eingesetzt. Die Dosierung der Brenngasbestandteile erfolgte mit Hilfe von Massendurchflussreglern (Bronkhorst EL-FLOW). Eine schematische Darstellung der Gasversorgungsstrecke mit Druck- und Temperaturmessstellen zeigt **Abbildung 4.24**.



**Abbildung 4.24:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Untersuchung des Verbrennungsverhaltens von schwachkalorischen Brenngasen mit hohen Wassergehalten (GE: Gaserhitzer, DE: Dampferzeuger, DZ: Drallerzeuger, LV: Luftverteiler). (Quelle: GWI)

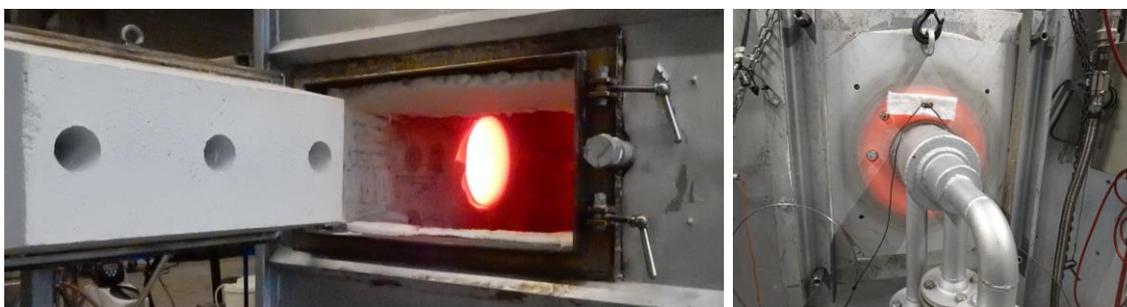
Zur Vermeidung von Kondensation des Wasserdampfes vor Eintritt in den Brennraum, wurde das  $\text{CH}_4/\text{N}_2$ -Gemisch auf  $120\text{ °C}$  vortemperiert. Die Temperierung des  $\text{CH}_4/\text{N}_2$ -Gemisches erfolgte mit Hilfe eines elektrischen Gaserhitzers (Leister, Typ 10000 S) durch die Erhitzung des Intergasanteils auf Temperaturen bis maximal  $600\text{ °C}$ . Der erhitzte Stickstoff wurde im Anschluss mit dem nicht-vorgewärmten  $\text{CH}_4$  zusammengeführt. Die Vorkonditionierung des Stickstoffs mittels des Gaserhitzers erfolgte geregelt auf die vorgegebene  $\text{CH}_4/\text{N}_2$ -Gemischtemperatur. Nachfolgend wurde der Wasserdampf ebenfalls mit  $120\text{ °C}$  in Strömungsrichtung eingedüst. Zur zusätzlichen Absicherung des elektrischen Gaserhitzers wurde ein Kondensatabscheider vorgeschaltet. Der Wasserdampf wurde kontinuierlich durch einen Dampferzeuger (Stritzel, Modell PS 300) mit einer maximalen Dampfleistung von  $50\text{ kg/h}$  bereitgestellt. Die in den Versuchen gemessenen brenngasseitigen Vordrücke bewegten sich im Betrieb mit  $100\text{ kW}$  Brennstoffleistung und unter Verwendung der  $3\text{ mm}$  Düsen zwischen  $80 - 100\text{ mbar}$ . Der Brennerbetrieb erfolgte in einem konditionierbaren Versuchsofen mit einer Ofenraumgröße von  $1,25\text{ m} \times 2,1\text{ m} \times 1,5\text{ m}$  ( $B \times L \times H$ ), der mittels vier integrierter erdgasbetriebener Strahlheizrohre auf Temperaturen von bis zu  $1.300\text{ °C}$  geregelt temperiert werden kann. Der Brenner wird stirnseitig in den Ofen eingebaut und feuert horizontal in den Ofenraum in Richtung des Ofenauslasses. Die Versuche erfolgten bei einer Ofenraumtemperatur von  $700\text{ °C}$ , somit konnte ein sicheres Zünden in der heißen Ofenraumatmosfera gewährleistet werden. In den Versuchen wurde bei konstanter Brennstoffleistung der  $\text{N}_2$ -Anteil ( $75\text{ Vol.-%}$ ) volumetrisch durch dampfförmiges Wasser in Schritten von  $15\text{ Vol.-%}$  ersetzt und die Auswirkungen auf die Verbrennungsstabilität sowie das Schadstoffverhalten durch eine kontinuierliche Abgasanalyse im Ofenauslass untersucht. Die Zuführung der Verbrennungsluft erfolgte partikel- und ölfrei durch ein Gebläse. Das Verbrennungsluftverhältnis wurde über den Restsauerstoffgehalt im Ofenabgas bestimmt. Die Feuerungsversuche erfolgten bei konstanter thermischer Leistung, die untersuchten Betriebsparameter sind in **Tabelle 4.6** zusammengefasst. Neben der Untersuchung der Abgaszusammensetzung, wurde die brennernahe

Brennraumtemperatur mit Hilfe von 2 Thermoelementen (Typ B) innerhalb des Flammenbereichs durch Zugänge in der Brennerrückwand in 50 mm und 100 mm Abstand zur Brennerinnenfläche und in 100 mm radialem Abstand zur Brennerlängsachse ermittelt.

*Tabelle 4.6: Brennerbetriebsparameter.*

Betriebsparameter	Wert / Wertebereich
Thermische Leistung	100 kW
Luftverhältnis $\lambda$	1,0 - 1,5
Erdgasvolumenstrom	10,7 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Inertgasvolumenstrom	32 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Wasseranteil im Brenngas	0 – 45 Vol.-%

Es erfolgte eine kontinuierliche Abgasuntersuchung im Abgaskanal, bei der die Stoffmengen- bzw. volumetrischen Anteile der Komponenten CO, NO, NO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> im trockenen Abgas bestimmt wurden. Für die Analyse wurden dazu kontinuierlich Proben über einen Partikelfilter und Abgaskühler abgesaugt. Die Messungen erfolgten mit konventionellen Analysegeräten (Rosemount NGA 2000 MLT4 / Binos 100 und Eco Physics CLD 822 Sr), für die Temperaturmessungen im Abgas und Ofenraum wurden Thermoelemente vom Typ B verwendet. Die Messwerte wurden für jeden Betriebspunkt nach ausreichender Haltezeit erfasst und über mehrere Minuten zeitlich gemittelt. Die Charakterisierung der Reaktionszone erfolgte durch die Detektion der Chemilumineszenz (OH\*) mit Hilfe einer bildverstärkten CCD-Kamera (LaVision Imager E-Lite + IRO) ausgestattet mit einem Nikon Nikkor UV-Objektiv und einem UV-Bandpassfilter. **Abbildung 4.25** zeigt den Brenner im Betrieb bei einem Blick durch die seitliche Ofenraumklappe (linkes Bild) sowie die Brennerrückseite bei den Betriebspunkten mit hoher thermischer Last (rechtes Bild).



*Abbildung 4.25: COSTAIR-Brenner im 100 kW-Schwachgasbetrieb mit 45 Vol.-% Wasseranteil im Brenngas; Blick auf den Flammenhalter durch die seitliche Ofenraumklappe (links) und Brennerrückansicht (rechts). (Quelle: GWI)*

In den Versuchen konnte der Wasseranteil im Brenngas auf bis zu 45 Vol.-% ohne Stabilitätseinbußen erhöht werden, Betriebspunkte mit darüberhinausgehenden H<sub>2</sub>O-Anteilen waren technisch nicht darstellbar. Für vier Betriebspunkte (0, 15, 30 und 45 Vol.-% H<sub>2</sub>O) wurde jeweils das Verbrennungsluftverhältnis im Bereich von  $\lambda = 1,0 - 1,5$  variiert. Die ermittelten CO- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen sind in **Abbildung 4.26** über dem Sauerstoffgehalt im trockenen Ofenabgas aufgetragen. Die Messwertverläufe mit zunehmendem O<sub>2</sub>-Gehalt wurden für die vier untersuchten Brenngaszusammensetzungen jeweils durch polynomielle Fits angenähert. In den Messwerten ist eine Reduktion der maximalen NO<sub>x</sub>-Werte von ca. 35 ppm bei 0 Vol.-% H<sub>2</sub>O-Anteil auf ca. 15 ppm im Falle von 45 Vol.-% H<sub>2</sub>O-Anteil im Brenngas zu beobachten. Die maximalen NO<sub>x</sub>-Gehalte traten jeweils nahe stöchiometrischer Bedingungen auf. Die CO-Konzentrationen

lagen für  $\lambda > 1$  durchweg an der Nachweisgrenze, dies lässt auf einen stabilen Betrieb des Brenners über einen weiten Luftverhältnissbereich, auch bei hohen Wasseranteilen im Brenngas schließen. Für den Fall ohne Wasserzugabe konnte ein geringer Anstieg der CO-Konzentration auf bis zu 15 ppm mit zunehmendem Luftüberschuss beobachtet werden.

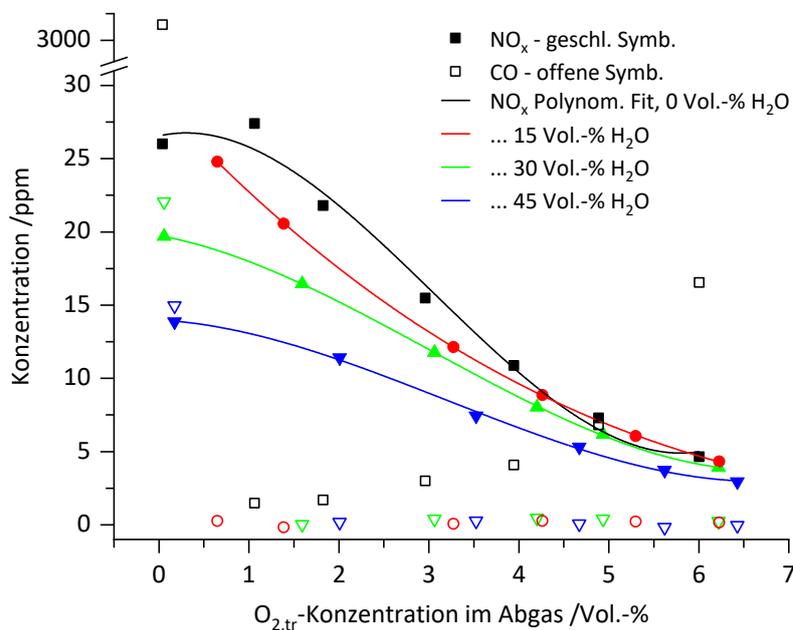


Abbildung 4.26: CO- und NO<sub>x</sub>-Konzentration im Abgas in Abhängigkeit vom Restsauerstoffgehalt für unterschiedliche Wasseranteile im Brenngas. (Quelle: GWI)

Abbildung 4.27 zeigt die brennernen Temperaturen im Ofenraum in der Messposition 50 mm und 100 mm von der Brennerrückwand sowie die Ofenabgastemperaturen, aufgetragen über dem Wasseranteil im Brenngas jeweils bei  $\lambda = 1,1$ . Die Messwertrends sind durch lineare Fits angedeutet.

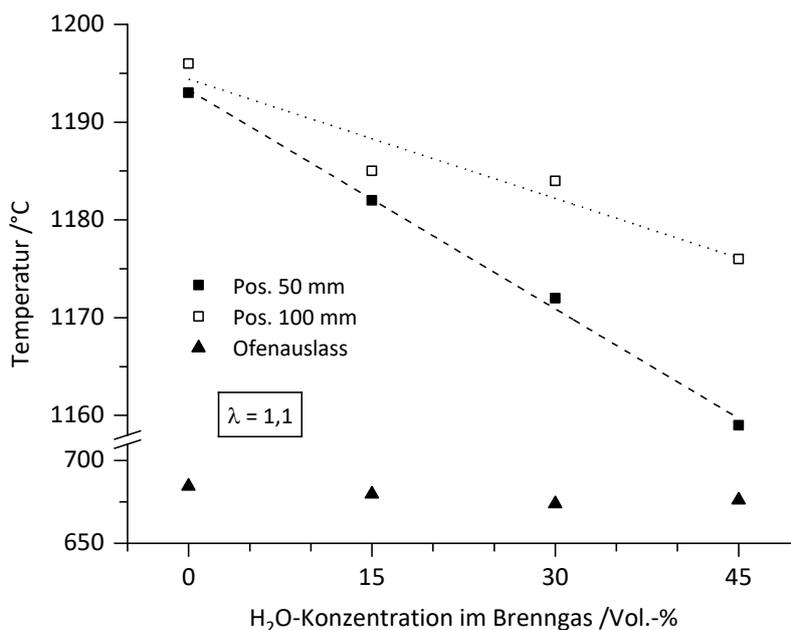
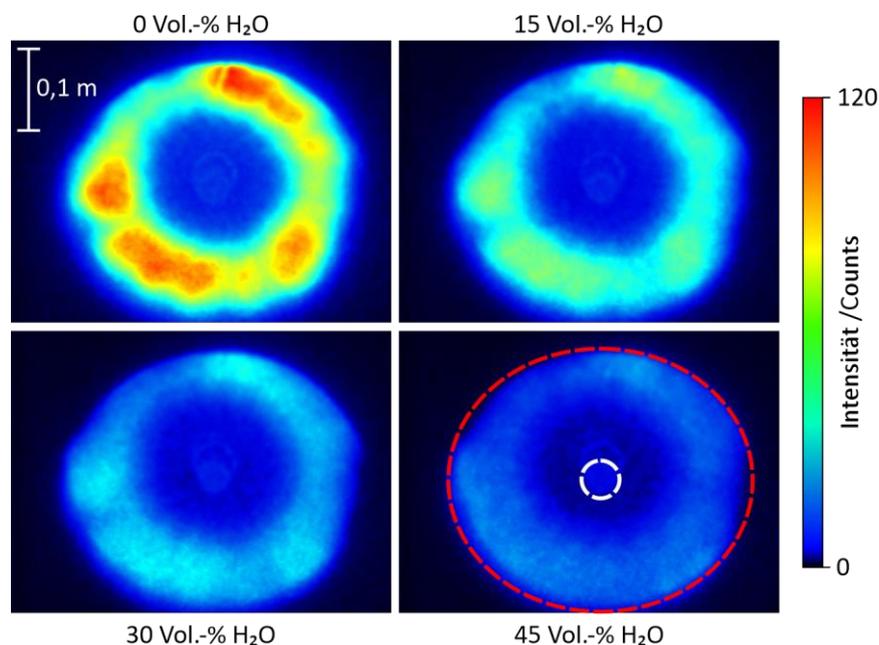


Abbildung 4.27: Temperaturen in Brennernähe und Abgas für verschiedene Wassergehalte im Brenngas. (Quelle: GWI)

In beiden Messpositionen nahe bzw. in der Reaktionszone wird die Abnahme der Temperaturen mit zunehmendem Wassergehalt deutlich, was auf die Senkung der Verbrennungstemperatur durch die höhere spezifische Wärmekapazität des Wassers zurückgeführt werden kann. In der 50 mm Position lag die Temperatur im Falle von 45 Vol.-% Wasseranteil etwa 35 °C niedriger als im Fall ohne Dampfzugabe. Die Abgastemperaturen im Ofenauslass lagen jeweils bei etwa 680 °C. Der sinkende Stickoxidgehalt im Abgas bei steigendem Wasserdampfanteil lässt sich auf die geringeren Verbrennungstemperaturen bei H<sub>2</sub>O-Zugabe und die dadurch geringere thermischen NO<sub>x</sub>-Bildung zurückführen. Eine Beeinträchtigung der Verbrennungsstabilität durch die Wasserzugabe konnte nicht festgestellt werden, für den gesamten untersuchten Betriebsparameterbereich wurde die Verbrennung stabil aufrechterhalten. Zusätzlich zu den gasanalytischen Messungen wurde eine bildgebende Charakterisierung der Reaktionszone anhand der OH\*-Chemilumineszenz der Flamme durchgeführt, die Rückschlüsse auf die Wärmefreisetzung zulässt. In **Abbildung 4.28** sind die über 100 Einzelaufnahmen mit jeweils 1 ms Belichtungszeit zeitlich gemittelten Bilder der Flammen mit 0, 15, 30 und 45 Vol.-% Wasseranteil im Brenngas dargestellt.



*Abbildung 4.28: OH\*-Chemilumineszenz bei unterschiedlichen Wassergehalten im Brenngas; Aufnahmen durch einen optischen Zugang in der Ofenrückwand; Brennerdraufsicht (rote Markierung - Begrenzung Flammenhalter, weiß - zentraler Staukörper / Luftverteiler). (Quelle: GWI)*

Die Aufnahmen erfolgten durch einen optischen Zugang in der Ofenrückwand oberhalb des Auslasskanals, der eine frontale Ansicht des Brenners zulässt. Die OH\*-Aufnahmen zeigen jeweils die Reaktionszone im Bereich des Flammenhalters. Alle untersuchten Fälle weisen eine für den COSTAIR-Brenner typische, ringförmige Verteilung der Intensitäten um den zentralen Luftverteiler auf. Mit zunehmendem H<sub>2</sub>O-Anteil sinken die Signalintensitäten, was auf eine lokal niedrigere Wärmefreisetzung zurückgeführt werden kann und mit den ermittelten brennernahen Temperaturen einhergeht. Die Aufnahmen weisen auf eine ähnliche Position und Ausdehnung der Flamme in allen Fällen hin. Die Ergebnisse zeigen die prinzipielle Eignung des COSTAIR-Brenners für den Einsatz von Brennstoffen mit hohen Wassergehalten im Hinblick auf den geplanten Einsatz von regenerativen Flüssigbrennstoffen der 2. und 3. Generation.

## 5 Entwicklung eines Brenners mit integriertem Verdampfungskonzept für flüssige Brennstoffe

### 5.1 Auswahl eines Brennerkonzeptes

#### 5.1.1 Brennerkonzepte

Im Rahmen der Konzeptionierung wurden zwei Design-Varianten für den Brenner entwickelt, die nachfolgend als „Variante 1“ und „Variante 2“ bezeichnet werden. Die entstandenen Varianten für das Brenner-Design zeigt **Abbildung 5.1**. Beide Varianten beruhen auf derselben Basiskonstruktion und unterscheiden sich im Wesentlichen in Bezug auf die Umsetzung der Luftstufung sowie der Zuführung der Flüssigbrennstoffe. In Variante 1 erfolgt die Verbrennungsluftzufuhr durch einen zentralen Luftverteiler, der durch eine rückwärtige Zuleitung beaufschlagt wird. Die Luft strömt radial in Wandrichtung aus und die Zuführung des Flüssigbrennstoffes erfolgt durch 4 radial um den Luftverteiler angeordneten Brennstoffdüsen. In Variante 2 wird der Flüssigbrennstoff nur durch eine zentral angeordnete Brennstoffdüse in den Brennraum eingebracht und die Luftzuführung erfolgt radial zur Mitte gerichtet durch einen kegelförmigen Luftverteiler von der Wandseite. Die Zuleitung der Luft erfolgt in diesem Fall über Durchgangsbohrungen in Brennerplatte. Die Zuführung der gasförmigen Brennstoffe ist in beiden Varianten identisch ausgeführt und erfolgt über zwei Düsenringe mit 16 und 32 Bohrungen auf Lochkreisen mit 80 mm bzw. 120 mm Durchmesser. Alle Bohrungen besitzen einen Durchmesser von 3 mm und sind auf dem jeweiligen Lochkreis in einem Winkel von 45° angestellt, wodurch der Gasströmung eine Strömungskomponente in radialer Richtung bzw. der benötigte Drall für die Ausbildung einer Rezirkulationsströmung aufgeprägt wird. Die Ausführung mit 2 Düsenringen, die unabhängig voneinander mit Brenngas beaufschlagt werden können, ermöglicht eine stufenweise Anpassung des Austrittsquerschnitts an die angeforderte Leistung bzw. den Durchsatz sowie die Austrittsgeschwindigkeit der Gasströmung.

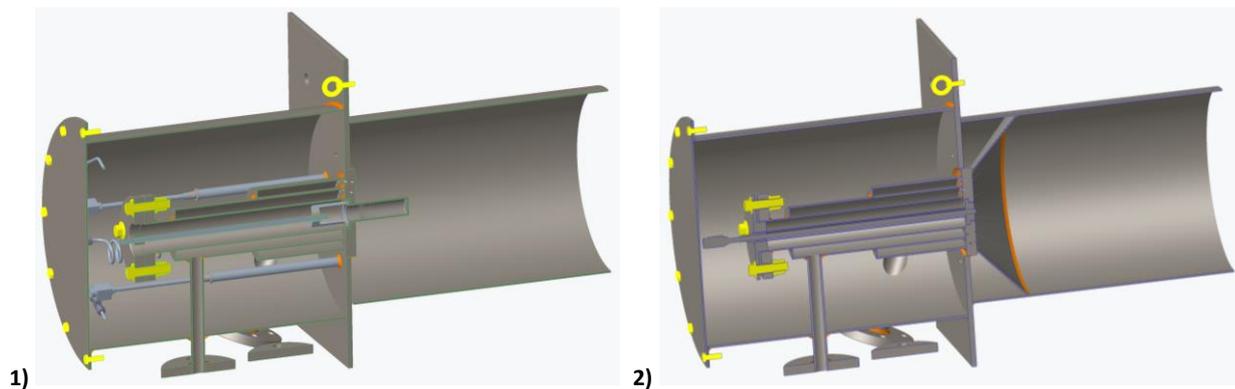


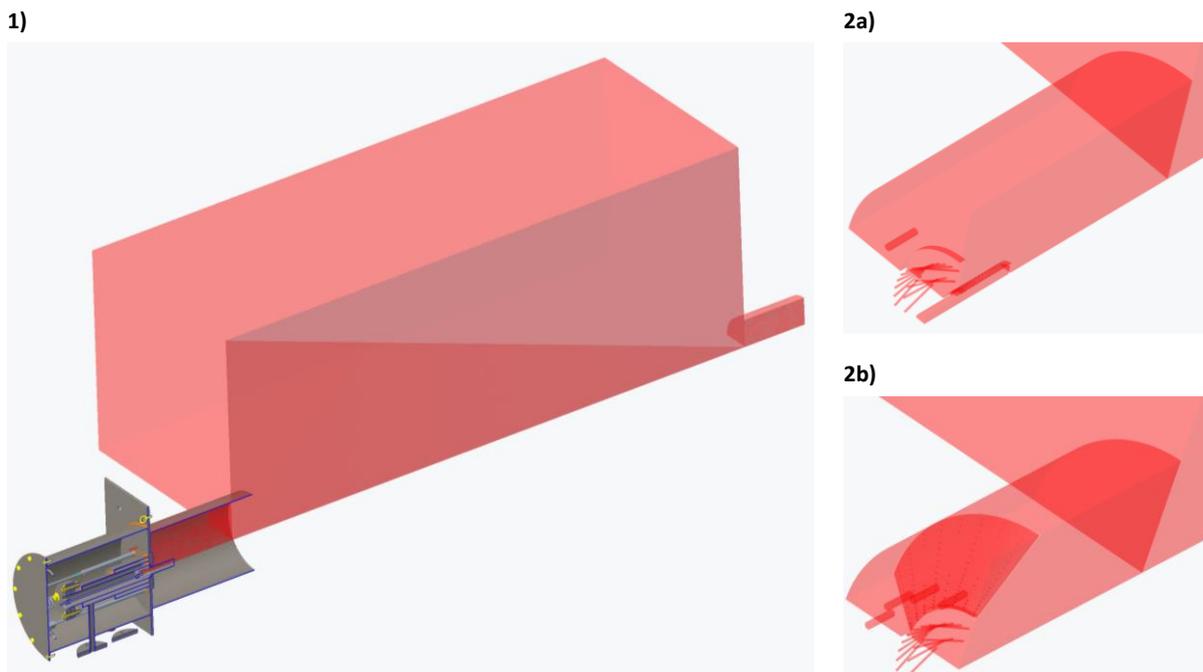
Abbildung 5.1: 3D-CAD-Modelle der Design-Varianten für den Mehrstoffbrenner. 1) Variante 1 mit zentralem Luftverteiler, 2) Variante 2 mit zentraler Brennstoffdüse – Schnittansicht. (Quelle: GWI)

Bei der Verwendung einer zentralen Brennstoffdüse ist der technische Aufwand für das Brennstoff-Handling deutlich reduziert und es ist eine optimale Spray-Ausbreitung und Gemischbildung zu erwarten, unter Inkaufnahme einer inhomogeneren Luftzuführung aus der Wandrichtung. Variante 1 erfordert im

Gegensatz dazu einen höheren technischen Aufwand für das Handling der Flüssigbrennerstoffe, ggf. aufgrund des längeren Leitungsweges dessen Beheizung, und ist durch die geringere Distanz der Spraykegel zur Brennraumwand problematischer in Bezug auf Ablagerungen, besitzt allerdings eine für die Gemischbildung optimalere düsenahen Einbringung der Verbrennungsluft. Für die Beurteilung der besseren Eignung und die Auswahl eines Konzeptes zur Umsetzung wurde das Strömungs- und Verbrennungsverhalten beider Varianten im Rahmen von numerischen Simulationen, jeweils für den Betrieb mit gasförmigen und flüssigen Brennstoffen getrennt voneinander untersucht.

#### 5.1.2 Untersuchung mittels numerischer Berechnungen für gasförmige Brennstoffe

Die entwickelnden Brennervarianten wurden im Rahmen von numerischen Untersuchungen mittels CFD überprüft. Dazu wurden stationäre RANS-Simulationen des Strömungs- und Verbrennungsverhaltens für den Betrieb mit gasförmigen Brennstoffen im GWI-Versuchsofen in ANSYS Fluent, Version 18 durchgeführt. Die zugrundgelegten Geometrien sind in **Abbildung 5.2** dargestellt. Unter Ausnutzung der Symmetrie um die Brennerlängsachse wurde für die Berechnungen ein Viertelsegment des durchströmten Volumens mit periodischen Randbedingungen zugunsten einer geringeren Berechnungszeit zugrunde gelegt. Für beide Brennervarianten wurde der Betrieb mit 100 kW Brennstoffleistung für vier in AP 1 festgelegte Gasgemische bei  $\lambda = 1,1$  und einer Ofenraumtemperatur von 800 °C simuliert.



*Abbildung 5.2: CFD-Geometrien - 1) Viertelsegment des Brennraums; Detailansichten des Flammenhalters mit den Einlaufvolumina für Brenngas und Luft - 2a) zu Variante 1 und 2b) zu Variante 2. (Quelle: GWI)*

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen wurden hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen sowie Spezieskonzentrationen ausgewertet und graphisch in 2D-Plots dargestellt. **Abbildung 5.3** bis **Abbildung 5.5** zeigen die Ergebnisse für Brennervariante 1 jeweils bei einer Leistung 100 kW und einem Luftverhältnis von  $\lambda = 1,1$  im Betrieb mit vier ausgewählten Brenngasgemischen (**Tabelle 4.3**).

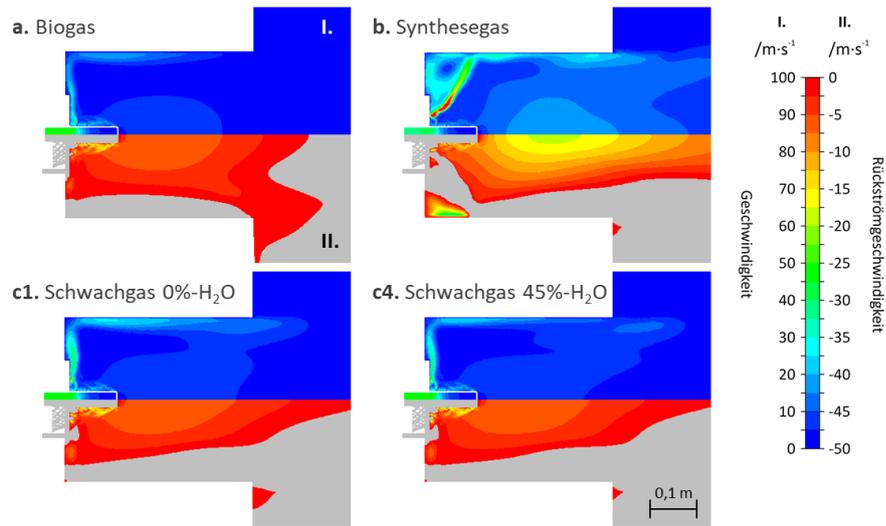


Abbildung 5.3: 2D-Verteilungen der Absolut- (oben, I.) und Rückströmgeschwindigkeit (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen – Variante 1. (Quelle: GWI)

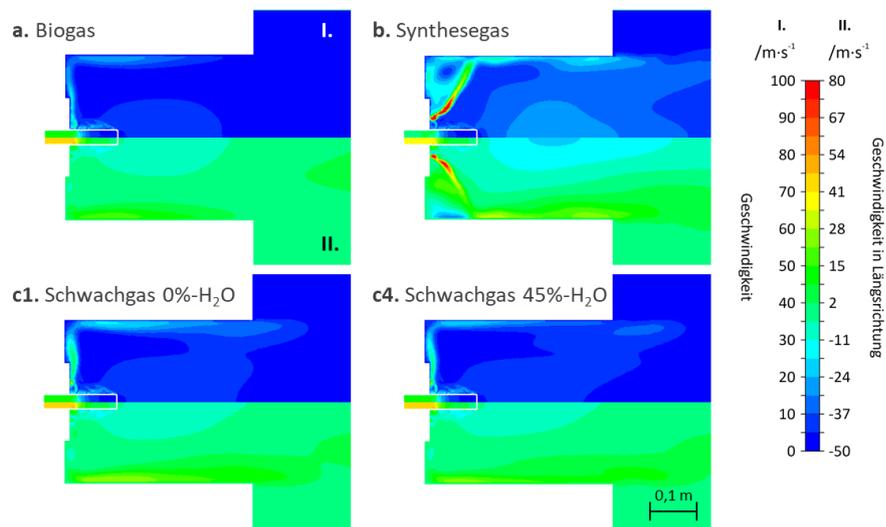


Abbildung 5.4: 2D-Verteilungen der Absolut- (oben, I.) und Geschwindigkeit in Längsrichtung (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen – Variante 1 (Quelle: GWI).

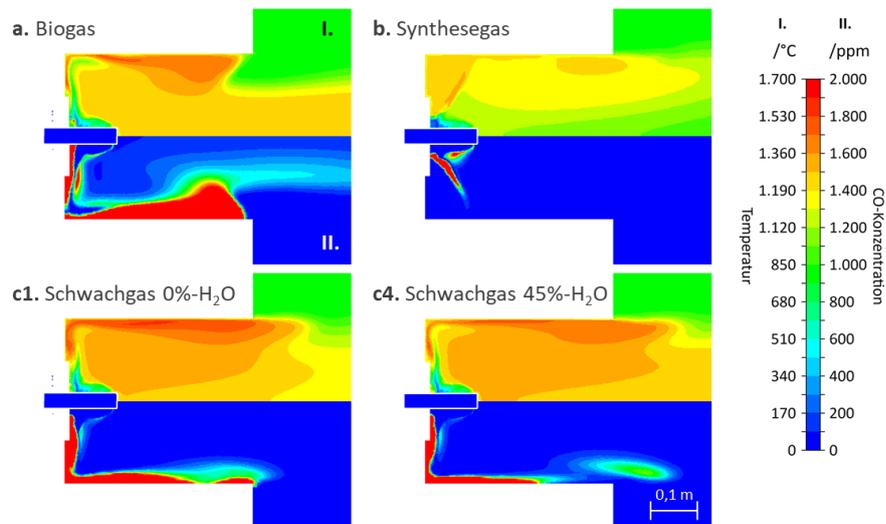


Abbildung 5.5: 2D-Verteilungen der Temperatur (oben, I.) und CO-Konzentration (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen – Variante 1 (Quelle: GWI).

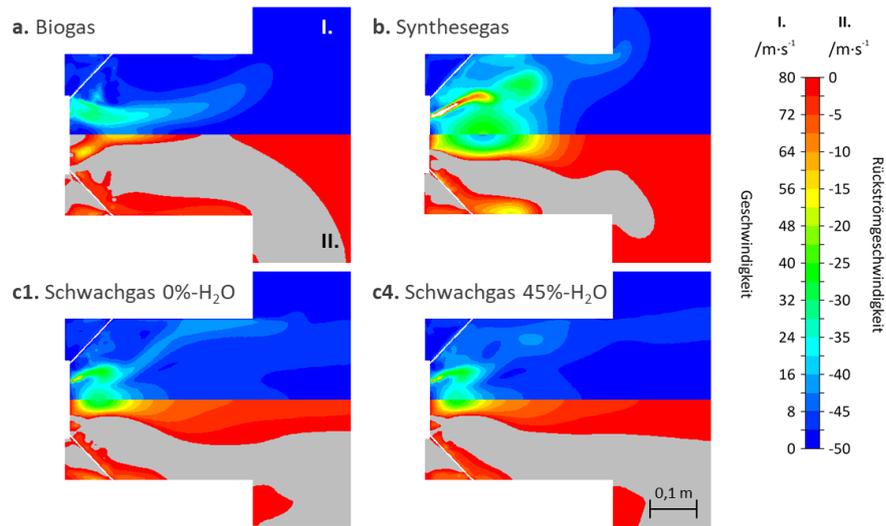


Abbildung 5.6: 2D-Verteilungen der Absolut- (oben, I.) und Rückströmgeschwindigkeit (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen – Variante 2. (Quelle: GWI).

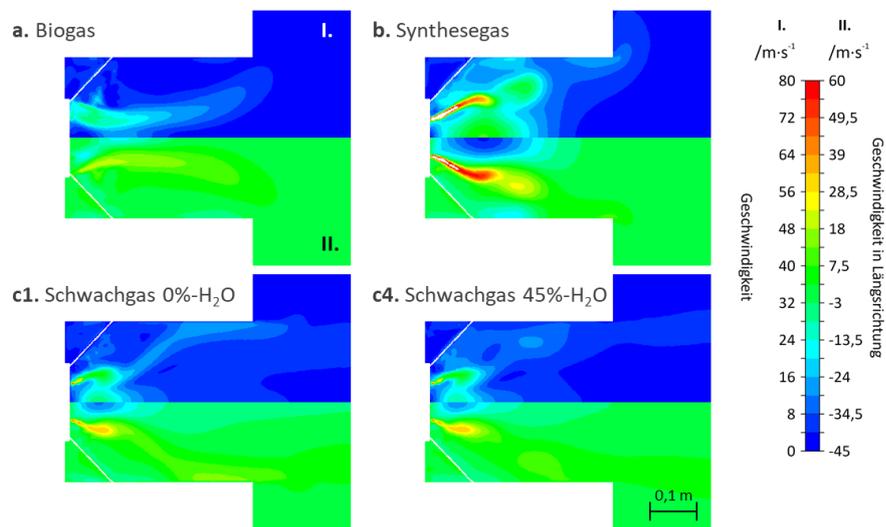


Abbildung 5.7: 2D-Verteilungen der Absolut- (oben, I.) und Geschwindigkeit in Längsrichtung (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen – Variante 2 (Quelle: GWI).

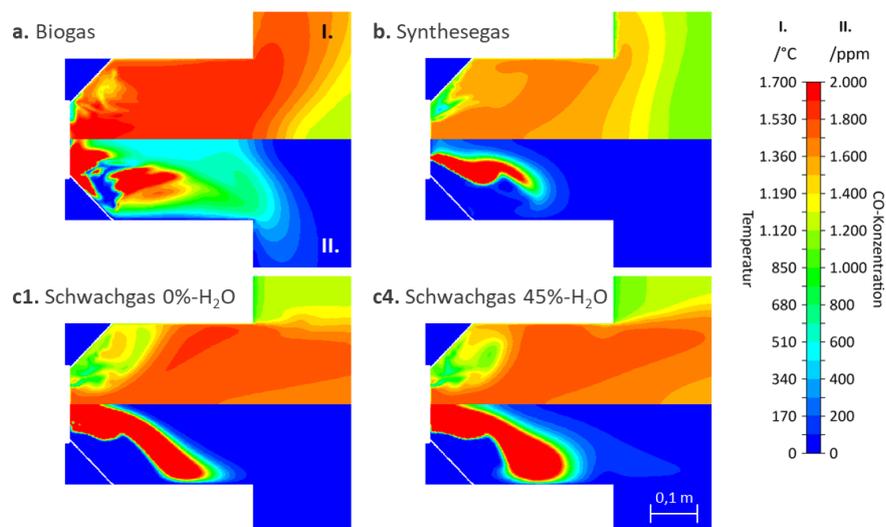


Abbildung 5.8: 2D-Verteilungen der Temperatur (oben, I.) und CO-Konzentration (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen – Variante 2 (Quelle: GWI).

In **Abbildung 5.3** wird jeweils die ebene Verteilung der Absolutgeschwindigkeit (oben, I.) sowie die Geschwindigkeitsanteile mit negativem Vorzeichen bzw. die Rückströmung in Richtung des Brenners (unten, II.) im vertikalen Schnitt tangential zur Mittelachse dargestellt. An der Brennumwand stellen sich für alle Fälle die höchsten Geschwindigkeiten ein, in der Mitte, oberhalb der zentralen Luftverteilerdüse entsteht eine Rezirkulationszone. **Abbildung 5.4** stellt die zugehörige Geschwindigkeitskomponente in axialer Richtung zusammen mit der Absolutgeschwindigkeit dar und **Abbildung 5.5** die zugehörigen Temperaturverteilungen zusammen mit der Verteilung der CO-Konzentration. Die Bereiche hoher CO-Konzentrationen (> 2000 ppm, in der Darstellung rot) lassen rückschließen auf die Position der Reaktionszone bzw. der Flamme. **Abbildung 5.6** bis **Abbildung 5.8** zeigen in analoger Weise die Verteilungen für die Brennervariante 2. Die Rezirkulation ist bei dieser Variante stärker ausgeprägt und die Gebiete hoher Strömungsgeschwindigkeit befinden sich in der Mitte des Flammenhalters. In **Abbildung 5.9** und **Abbildung 5.10** werden die Temperaturverteilungen sowie das Rückströmverhalten beider Varianten für den gesamten Ofenraum gegenübergestellt.

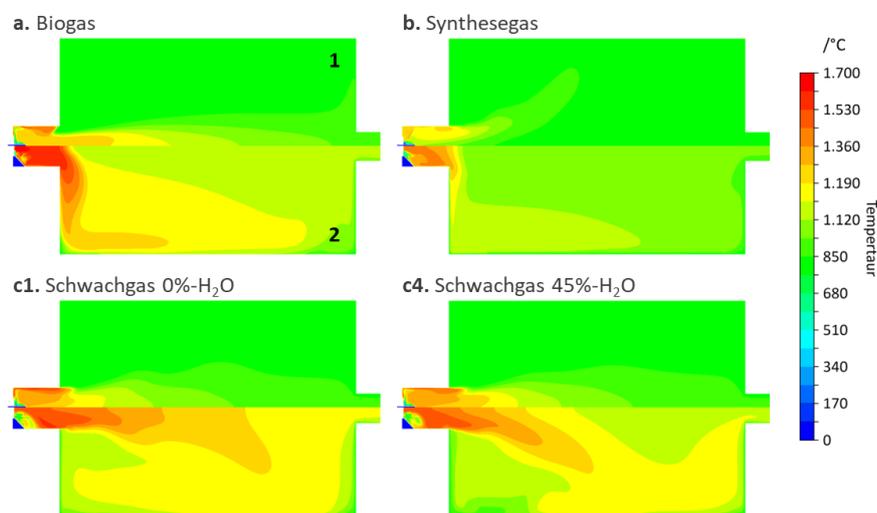


Abbildung 5.9: 2D-Verteilungen der Temperatur im gesamten Ofenraum - Vergleich zwischen Variante 1 (oben, 1) und Variante 2 (unten, 2). (Quelle: GWI)

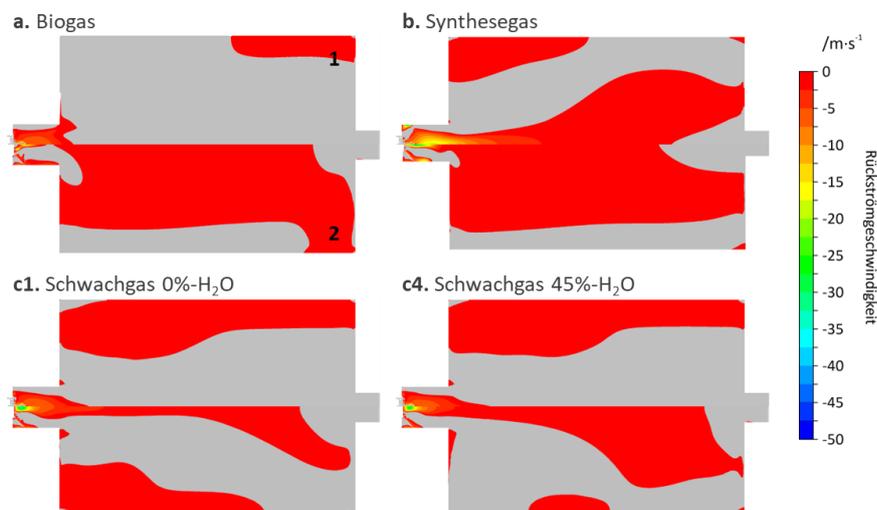


Abbildung 5.10: 2D-Verteilungen der Rückströmgeschwindigkeit im gesamten Ofenraum - Vergleich zwischen Variante 1 (oben, 1) und Variante 2 (unten, 2). (Quelle: GWI)

### 5.1.3 Untersuchung mittels numerischer Berechnungen für flüssige Brennstoffe

Variante 1 sieht die Einbringung von vier Brennstoffdüsen an der Deckplatte zwischen der zentralen Luftzufuhr und der Brennerwand im COSTAIR-Brenner vor, siehe **Abbildung 5.11**. Öldüsen haben immer einen rotationssymmetrischen Spraykegel. Sind die Öldüsen außerhalb der Symmetrieachse des Brenners angeordnet, entsteht über den Umfang des Brenners eine inhomogene Verteilung der Brennstofftropfen. Betrachtet man die Strömung in radialen Schnitten über den Umfang des Brenners entstehen immer Zonen, in denen unverdampfter Brennstoff von der Strömung an Brennerbauteile getragen wird. Das Konzept wurde schließlich aufgrund einer unzureichenden Gemischbildung verworfen.

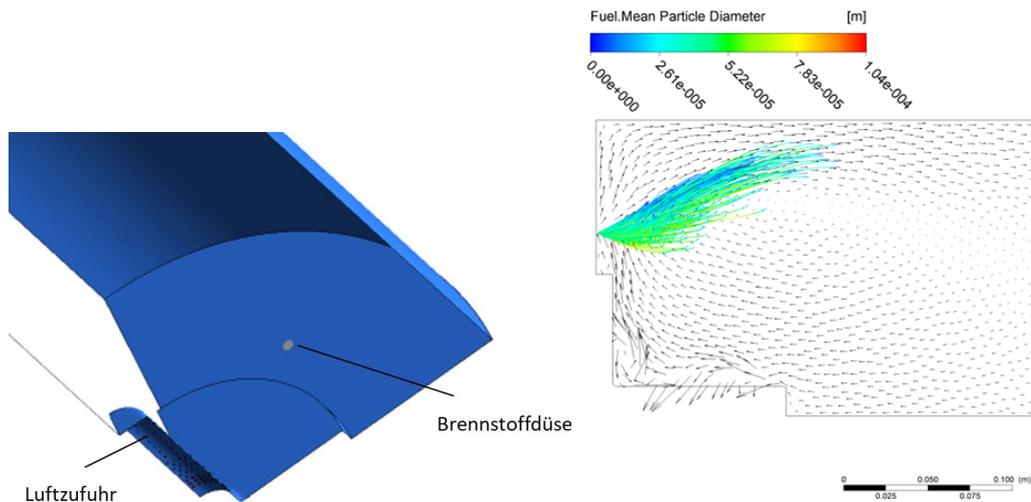


Abbildung 5.11: Konzept mit 4 radial verteilten Brennstoffdüsen. (Quelle: OWI)

Variante 2 stellt einen invertierten COSTAIR-Brenner dar, bei dem die Luft über einen außenliegenden Konus zugegeben wird. Zentral an der Deckplatte kann der flüssige Brennstoff mit einer Düse eingebracht werden. Die numerischen Berechnungen mit Pyrolyseöl zeigen, dass sich im Vergleich zum Gasbetrieb die Rezirkulationsströmung umkehrt. Der durch den Brenngasstrom aufgeprägte Drall fehlt im Betrieb mit flüssigen Brennstoffen. Es findet zwar ein Umsatz des Brennstoffes statt, jedoch bildet sich ein sehr großes brennstoffreiches Gebiet aus, welches eine Ablagerungsbildung an den Brennkammerwänden und Rußbildung fördert. Für den invertierten Brenner stellte sich heraus, dass ein Betrieb mit den angestrebten flüssigen Brennstoffen möglich ist, wenn die benötigte Verbrennungsluft primär radial um die Öldüse eingebracht wird, vgl. **Abbildung 5.12**.

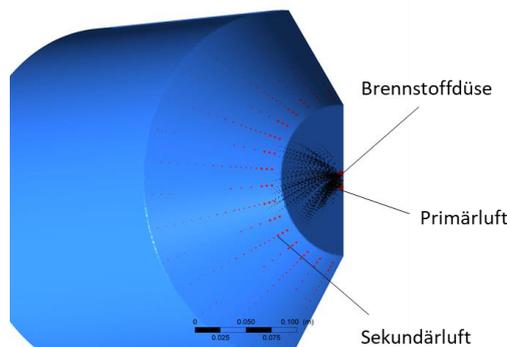
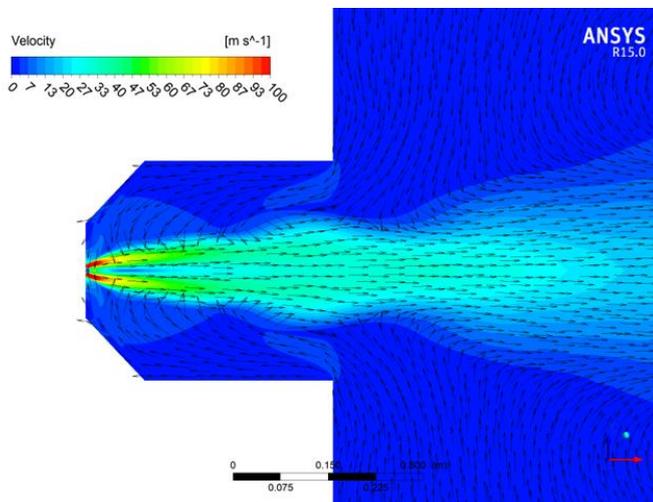


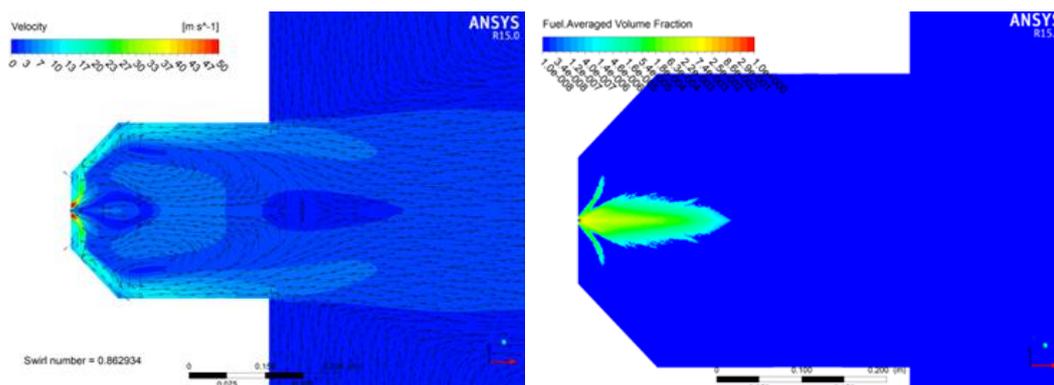
Abbildung 5.12: Invertierter Brenner mit zentraler Brennstoffeindüsung. (Quelle: OWI)

Bei der aktuellen Ausführung ist der Durchmesser des Brennraums relativ groß, sodass durch die daraus resultierende wandnahe Rezirkulationströmung und bei niedrigen Temperaturen im Ofen die Flamme sehr weit ausgetrieben wird, vgl. **Abbildung 5.13**. Es ist eine weitere Anpassung der Primärluftparameter hinsichtlich des Dralls und der Geschwindigkeit notwendig. Darüber hinaus wird die Sekundärluft an der Flammenwurzel eingemischt und trägt damit nicht zur Reduzierung der Stickoxidbildung bei.



*Abbildung 5.13: Strömungsprofil invertierter Brenner, 100 kW Pyrolyseöl, Luftverhältnis 1,2, 70 % Primärluft, Drallwinkel Primärluft 50°. (Quelle: OWI)*

Mittels weiterer Anpassungen von Parametern wie Aufteilung der Verbrennungsluft in Primär- und kontinuierlich zugeführter Sekundärluft, Drehimpuls der Primärluft und Spraykegel konnte die Gemischbildung optimiert werden. Der Brennstoff wird zentral in die Zone der Verdunstung mit einem verdrallten Primärluftstrom eingedüst. Der Primärluft strömt radial über den Brennermund ab. Im Flammrohr bildet sich auf der Strahlachse eine Rezirkulationströmung aus, welche heißes Abgas in die Zone vor den Brennermund zurückführt, siehe **Abbildung 5.14** (links).



*Abbildung 5.14: Invertierter Brenner Strömungsgeschwindigkeiten (links), Volumenanteil nicht verdunsteter Brennstoff (rechts). (Quelle: OWI)*

Der zerstäubte Brennstoff breitet sich stromabwärts auf der Strahlachse aus. Der Brennstoff wird in dem zurückgeführten Abgas verdunstet, bevor er in Richtung Brennermund umgelenkt, mit primärer Verbrennungsluft gemischt wird und zündet. Der Flamme strömt über den kegelförmigen Luftverteiler und das Flammrohr stromabwärts in den Ofenraum. Durch den Luftverteiler wird der Verbrennung kontinuierlich sekundäre Verbrennungsluft zugeführt.

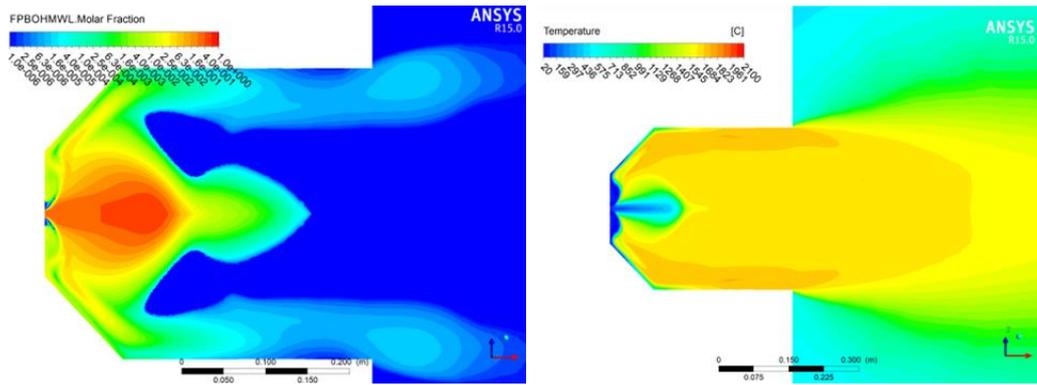


Abbildung 5.15: Volumenanteil verdunsteter Brennstoff (links), Flammentemperaturen (rechts). (Quelle: OWI)

Die kontinuierliche Luftstufung vermeidet hohe Flammentemperaturen und damit die Bildung von thermischem Stickoxid, siehe **Abbildung 5.15** (rechts).

## 5.2 Brenner für 100 kW thermische Leistung

### 5.2.1 Brennerkonstruktion

Auf Basis der 2. Design-Variante (vgl. **5.1.1**) wurde die Brennerkonstruktion ausgearbeitet. Ein 3D-CAD-Modell der finalen Brennerkonstruktion zeigt **Abbildung 5.16**.

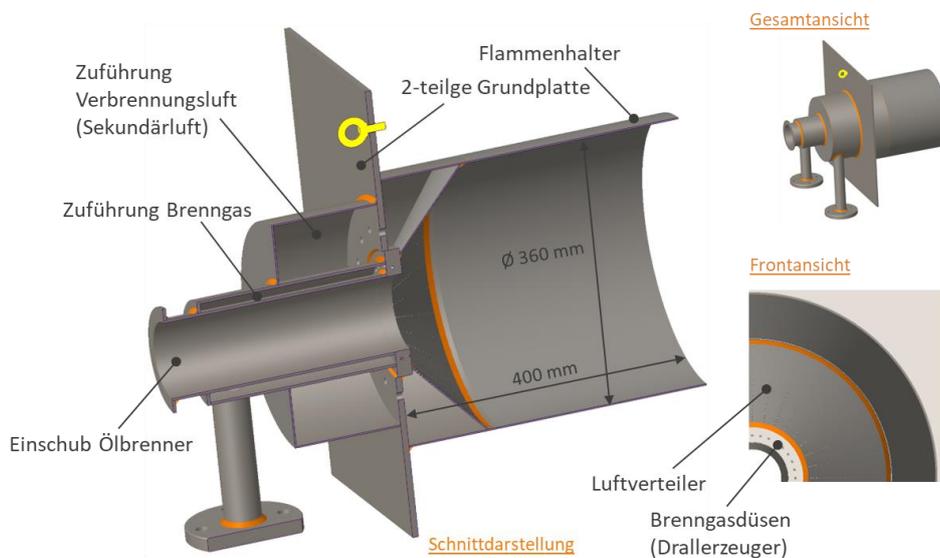


Abbildung 5.16: 3D-CAD-Modell der finalen Brennerkonstruktion. (Quelle: GWI)

Die Konstruktion wurde im Hinblick auf die Implementierung einer Öl-Brennereinheit, bestehend aus einer zentralen Brennstoffdüse und einer umliegend angeordneten Primärluftzufuhr mit Drallerzeuger, weiterentwickelt und sieht für die Öl-Einheit einen zentralen Einschub vor. Die Befestigung der Öl-Einheit erfolgt über einen rückwärtigen Flansch mittels einer Klemmverbindung. Aufgrund einer erforderlichen düsennahen Primärluftzuführung wurde auf einen zweiten Lochkreis für die Brenngaszufuhr verzichtet und nur ein Gasdüsenring bzw. Drallerzeuger vorgesehen, der 32 Bohrungen mit je 3 mm Durchmesser auf einem Lochkreisdurchmesser von 120 mm besitzt. Der Gesamtaufbau wurde durch die Einsparung von

Bauteilen insbesondere im Bereich der Gaszuführung vereinfacht, wodurch der benötigte Material- und Fertigungsaufwand minimiert werden konnte. Durch die abgesetzte Brennerplatte mit im Bereich der Brennergasdüsen 20 mm und im äußeren, thermisch gering belasteten Bereich, 10 mm Dicke, konnte das Gesamtgewicht der Konstruktion reduziert werden. Die Konstruktion ermöglicht sowohl den Einsatz im Versuchsofen, als auch im Prüfflammrohr des GWI. Die geänderte Brenngasdüsenkonfiguration wurde mittels CFD überprüft und optimiert.

### 5.2.2 Numerische Berechnungen für die finale Geometrie

Die in Bezug auf den Öl-Betrieb notwendigen konstruktiven Änderungen erforderten eine Anpassung der Düsengeometrie. Mit der angepassten Geometrie wurden CFD-Simulationen für ausgewählte Bedingungen durchgeführt. Die den Simulationen zugrundeliegende Geometrie zeigt **Abbildung 5.17**.

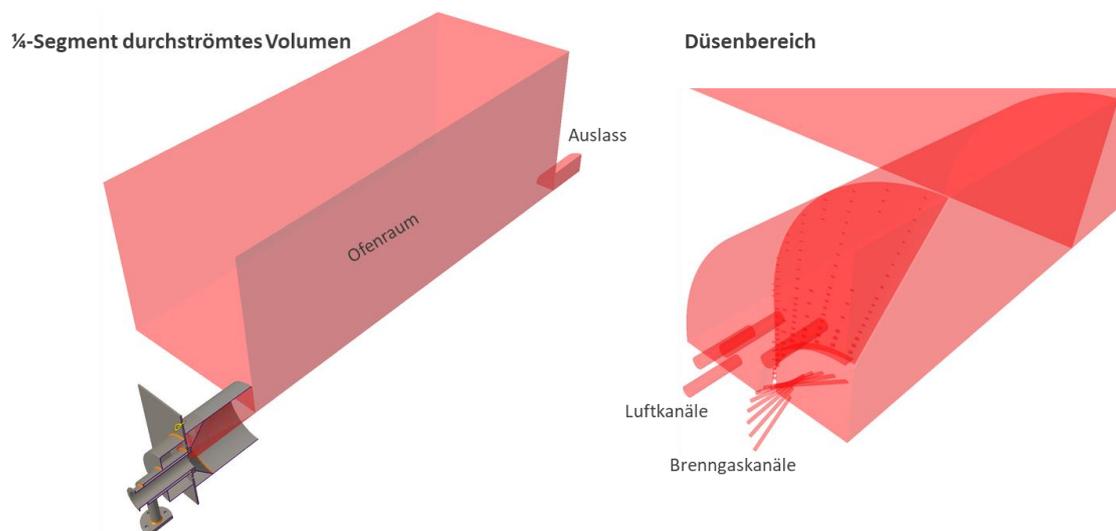


Abbildung 5.17: CFD-Geometrie für die numerische Untersuchung der finalen Brennerkonstruktion. (Quelle: GWI)

Es wurden stationäre RANS-Simulationen des Strömungs- und Verbrennungsverhaltens mit ANSYS Fluent, Version 18 für den Betrieb mit vier verschiedenen Brenngasen (a. Biogas, b. Synthesegas, c1. Schwachgas, c4. Schwachgas - feucht) analog zu den Simulationen der Vorauslegung durchgeführt. Unter Ausnutzung der Symmetrie um die Brennerlängsachse wurde ein Viertelsegment des durchströmten Volumens mit periodischen Randbedingungen zugunsten einer geringeren Berechnungszeit zugrunde gelegt. Simuliert wurde der Betrieb im GWI-Versuchsofen bei jeweils 100 kW Brennstoffleistung, einem Luftverhältnis  $\lambda = 1,1$  und einer Ofentemperatur von 800 °C. Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen wurden hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen sowie Spezieskonzentrationen ausgewertet und graphisch in 2D-Plots dargestellt. **Abbildung 5.18** zeigt die resultierenden Verteilungen der Absolut- und Rückströmgeschwindigkeit sowie **Abbildung 5.19** der Absolut- und Geschwindigkeitskomponente in axialer Richtung im Brennernahbereich. **Abbildung 5.20** zeigt die Verteilungen der Temperatur und CO-Konzentration im Flammenhalter. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit vom verwendeten Brenngas. Die angestrebte Rezirkulation von heißem Abgas konnte für alle Betriebsfälle erreicht werden. Zudem weisen die Verteilungen in Bezug auf die thermische Bauteilbeanspruchung relativ niedrige Temperaturen in Düsennähe auf. Eine stabile Verbrennung konnte für alle untersuchten Fälle mit der angepassten Brennergeometrie etabliert werden.

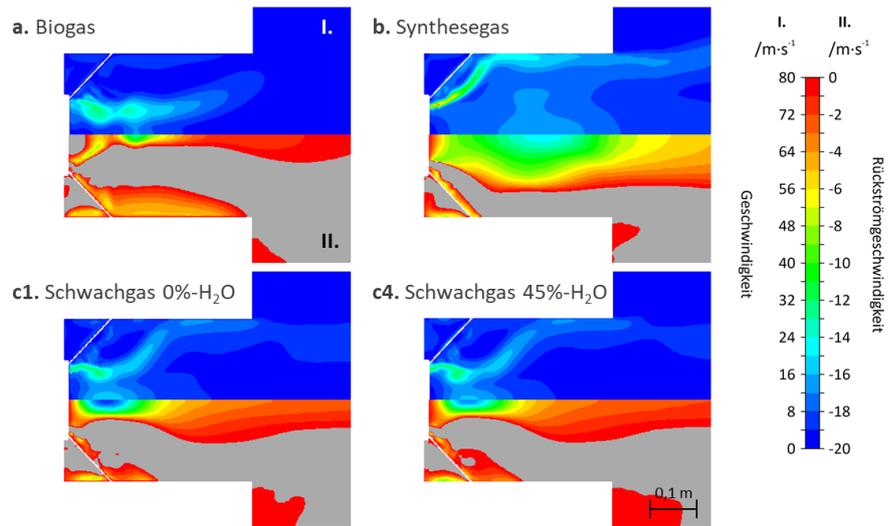


Abbildung 5.18: 2D-Verteilungen der Absolut- (oben, I.) und Rückströmgeschwindigkeit (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen. (Quelle: GWI).

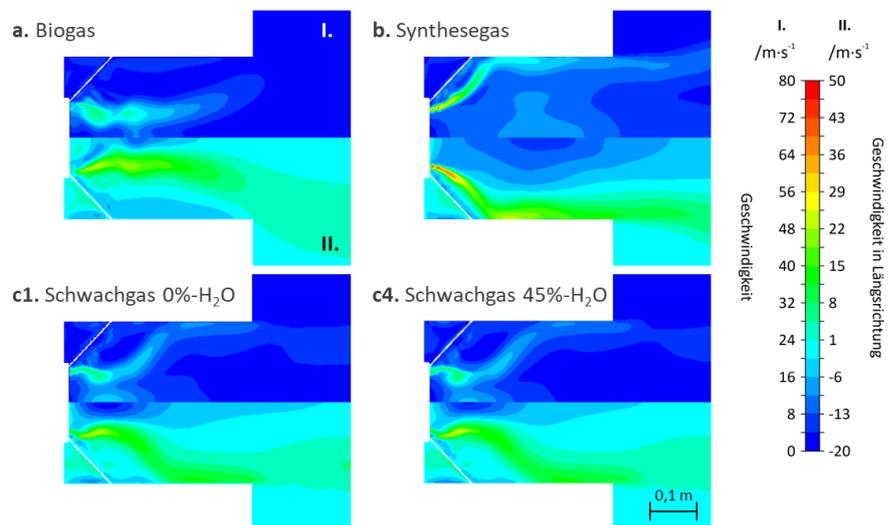


Abbildung 5.19: 2D-Verteilungen der Absolut- (oben, I.) und Geschwindigkeit in Längsrichtung (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen. (Quelle: GWI).

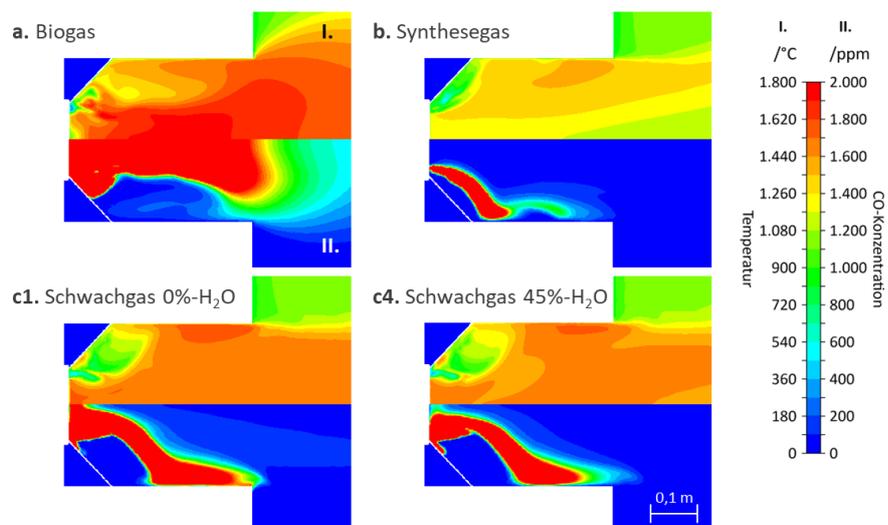
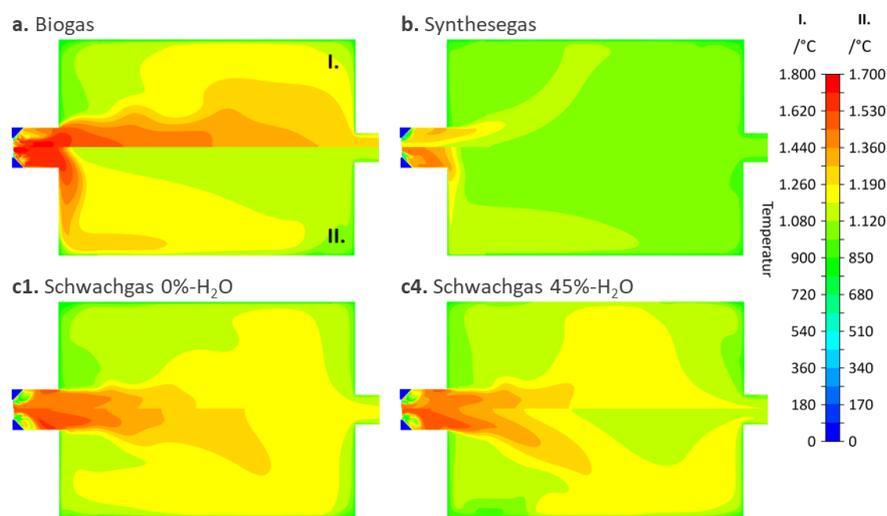


Abbildung 5.20: 2D-Verteilungen der Temperatur (oben, I.) und CO-Konzentration (unten, II.) für den Betrieb bei 100 kW und  $\lambda = 1,1$  mit unterschiedlichen Brenngasen. (Quelle: GWI).

Die CFD-Ergebnisse der angepassten Düsenkonfiguration wurden mit denen der Vorabversion (16 Brenngasdüsen mit 3 mm Durchmesser, Lochkreisdurchmesser 80 mm, vgl. 5.1.2) verglichen. Die Temperaturverteilungen im Ofenraum sind in **Abbildung 5.21** gegenübergestellt. Es werden für alle untersuchten Brenngaszusammensetzungen im Vergleich zur Vorversion ähnliche Maximaltemperaturen erreicht. Die Verteilungen weisen nach der Anpassung der Düsengeometrie allerdings insbesondere in den Fällen Biogas (a.) und Synthesegas (b.) deutliche Änderungen auf. Durch den geänderten Lochkreis der Brenngasdüsen wird in diesen Fällen eine längsgerichtete Abströmung in den Ofenraum erzielt, die zu höheren Temperaturen in der Ofenraummitte führt. Eine unerwünschte Abströmung entlang der Ofenraumwand hat sich mit der angepassten Düsenkonfiguration nicht eingestellt. Für die angepasste Düsenkonfiguration ergibt sich zudem eine günstigere Temperaturverteilung im brennernen Bereich, die zu einer geringeren thermischen Bauteilbelastung im Betrieb führen kann.



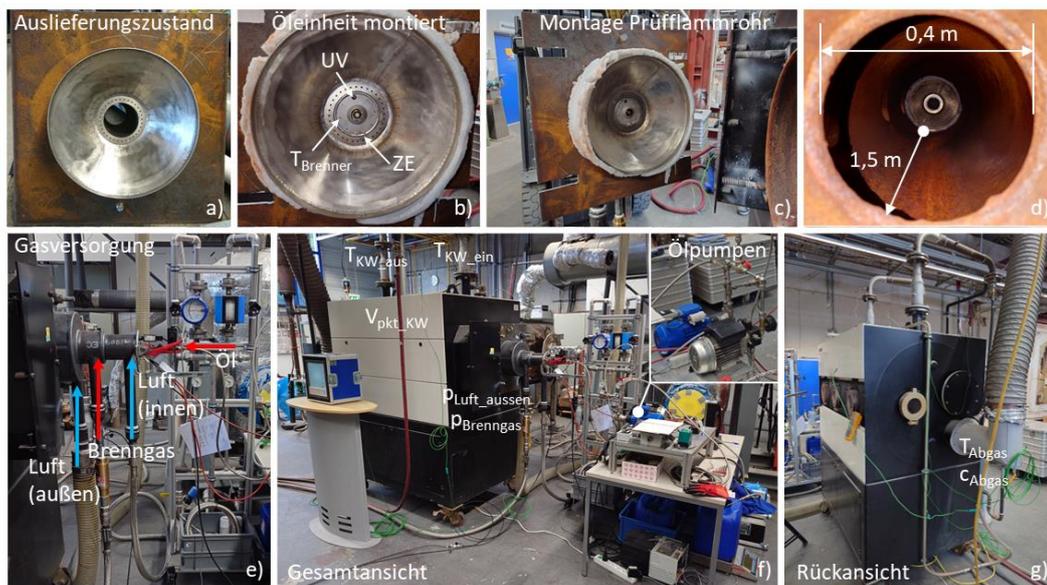
*Abbildung 5.21: 2D-Verteilungen der Temperatur im Ofenraum für die angepasste Düsengeometrie (oben, I.) und die Vorversion (unten, II.; vgl. 5.1.1) für den Betrieb mit unterschiedlichen Brenngasen. (Quelle: GWI)*

Die Auslegung und Optimierung der Brennergeometrie konnten mit den erzielten Ergebnissen abgeschlossen werden. Die Konstruktionsdaten wurden für die Fertigung des Funktionsmusters aufbereitet und bereitgestellt.

## 6 Erprobung des Brenners in einer Kesselanwendung

### 6.1 Versuchsanordnung und -durchführung

Das 100-kW-Funktionsmuster des Brenners wurde im GWI-Technikum für den Einsatz in einer Kesselanwendung erprobt. Die Erprobung erfolgte in einem Prüfflammrohr, ausgelegt für eine maximale thermische Last von 232 kW, das eine Stoff- und Energiebilanzierung des Betriebs ermöglicht. Das Funktionsmuster und der experimentelle Versuchsaufbau sind in **Abbildung 6.1 a) – g)** dargestellt. **Abbildung 6.1 a)** zeigt den Auslieferungszustand des COSTAIR-Brenners mit zentraler Öffnung für den Einschub der Öl-Brennereinheit. In der Öl-Brennereinheit wurde ein Thermoelement eingesetzt, das auf einem Umkreis von 80 mm um die zentrale Öldüse positioniert ist und zur Erfassung von Temperaturen in Brennernähe ca. 10 mm in den Brennraum rangt, siehe **Abbildung 6.1 b)**. Die Öl-Einheit beinhaltet sowohl zwei Elektroden (ZE) für die Zündung des Brenners, als auch einen optischen Zugang (UV) zur Überwachung der Flamme mit einem UV-Sensor. Die Brennstoffversorgung erfolgte mit Hilfe von Massendurchflussreglern für die Brenngase bzw. Ölpumpen. Die Versorgung mit Verbrennungsluft (Umgebungsluft, ohne Vorwärmung) des COSTAIR-Brenners (Sekundärluft im Ölbetrieb) erfolgte über ein Gebläse, die Primärluft der Öl-Einheit wurde über eine ölfreie Pressluftversorgung bereitgestellt.



**Abbildung 6.1:** Versuchsaufbau an einem 200-kW-Prüfflammrohr im Technikum des GWI; 100-kW-Funktionsmuster mit Zündelektroden (ZE) und optischem Zugang für die Flammenüberwachung (UV). (Quelle: GWI)

**Abbildung 6.1 d)** zeigt den Einbauzustand im Prüfflammrohr, betrachtet durch das geöffnete rückseitige Fenster. Der Brenner füllt mit der umliegenden feuerfesten Faserisolierung den Durchmesser des Flammrohres vollständig aus. Durch die seitwärtigen und das rückwärtige Fenster kann eine bildgebende Erfassung der Flamme erfolgen. Messtechnisch erfasst wurden neben den Luft- und Brennstoffdurchsätzen, die Abgaszusammensetzung bzw. die Konzentrationen der Komponenten CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> des trockenen Abgases, die brennernahe Temperatur sowie die Abgastemperatur im Auslass und die Drücke

in der Gas- und (Sekundär-)Luftzuleitung am Brenner. Für die Bestimmung des Wärmeaustrags wurden die Vor- und Rücklaufemperatur des Kühlwassers sowie der Kühlwasservolumenstrom durch den Wärmetauscher des Flammrohres erfasst.

Die Feuerungsversuche erfolgten bei einer konstanten Brennstoffleistung von 100 kW mit den in **Tabelle 6.1** aufgeführten Brenngasgemischen. Um eine ausreichende Verbrennungsstabilität und die Betriebssicherheit zu gewährleisten, wurden die Zusammensetzungen im Vergleich zu den in **4.1.2** vorgeschlagenen Brenngasen abgewandelt bzw. durch weitere Mischungen ergänzt. Das „Schwachgas“ (A1), bestehend aus Erdgas und N<sub>2</sub>, wurde für die erste Charakterisierung des Betriebsverhaltens verwendet und in der Folge als Referenzfall für die Untersuchungen mit weiteren Brennstoffen herangezogen. Als exemplarische Flüssigbrennstoffe wurden Heizöl leicht (HEL) und Altreifenpyrolyseöl (APO) eingesetzt. Im Mischbetrieb erfolgte die Feuerung mit je 50 kW Gas- und Flüssigbrennstoffleistung. Der Ölbetrieb erfolgte mit 80 kW Flüssigbrennstoffleistung unter Zufeuerung von 20 kW aus einem H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Gemisch, die sich für eine stabile Etablierung der Ölverbrennung innerhalb des Prüfflammrohres als erforderlich erwies. Im Misch- und Ölbetrieb wurde die zugeführte Verbrennungsluft in Primär- (Öl-Einheit) und Sekundärluft (COSTAIR) aufgeteilt. Im Mischbetrieb wurde der Brenner mit einem konstanten Sekundärluftvolumenstrom von 75 m<sup>3</sup>/h sowie 65 m<sup>3</sup>/h im Ölbetrieb beaufschlagt. Im Gasbetrieb wurde die Öl-Einheit mit 10 m<sup>3</sup>/h Luft über die Primärluftstrecke gekühlt. Für die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens wurde in den Feuerungsversuchen der Verbrennungsluft- bzw. Primärluftvolumenstrom schrittweise bei konstanter Brennstoffleistung erhöht.

**Tabelle 6.1: Verwendete Brenngaszusammensetzungen für den Gas-, Misch- und gestützten Ölbetrieb.**

#	Bezeichnung	c(CH <sub>4</sub> )* /Vol.-%	c(CO <sub>2</sub> ) /Vol.-%	c(CO) /Vol.-%	c(H <sub>2</sub> ) /Vol.-%	c(H <sub>2</sub> O) /Vol.-%	c(N <sub>2</sub> ) /Vol.-%	
A1	Schwachgas (CH <sub>4</sub> / N <sub>2</sub> )	50	-	-	-	-	50	Gasbetrieb
A2	Biogas	60	40	-	-	-	-	
A3.1	Synthesegas (SynGasA)	5,6	11,1	11,1	16,7	0	55,5	
A3.2	Synthesegas (SynGasA +N <sub>2</sub> )	5	10	10	15	0	60	Mischbetrieb mit HEL und APO
B1.1	Synthesegas (SynGasB1)	8,9	17,9	0	26,8	0	46,4	
B1.2	Synthesegas (SynGasB2)	10	0	0	25	0	65	Ölbetrieb mit HEL und APO
C	Stützflamme (+H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> )	-	-	-	50	-	50	

\*substituiert mit Erdgas  
HEL: Heizöl leicht | APO: Altreifenpyrolyseöl

## 6.2 Messtechnische Charakterisierung

### 6.2.1 Reaktionszone

Mit Hilfe von bildgebenden Aufnahmen wurde die Form und Lage der Reaktionszone erfasst. **Abbildung 6.2** zeigt Fotoaufnahmen ausgewählter Gas- und Ölflammen, aufgenommen durch die brennernahe seitliche sowie die rückwärtige Fensteröffnung des Prüfflammrohres. Bei der Gasverbrennung ändert sich die Ausbreitung der Flamme stark mit dem Brenngas bzw. den vorherrschenden Strömungsbedingungen. In den dargestellten Fällen „A2 (Biogas)“ und „A1 (CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>)“ treten im Vergleich zu „A3.1 (SynGasA)“ deutlich

geringere Austrittsgeschwindigkeiten an den Brenngasdüsen auf (vgl. 5.2.2), entsprechend ist die Flamme in der Mitte und nahe der Brenngasdüsen lokalisiert.

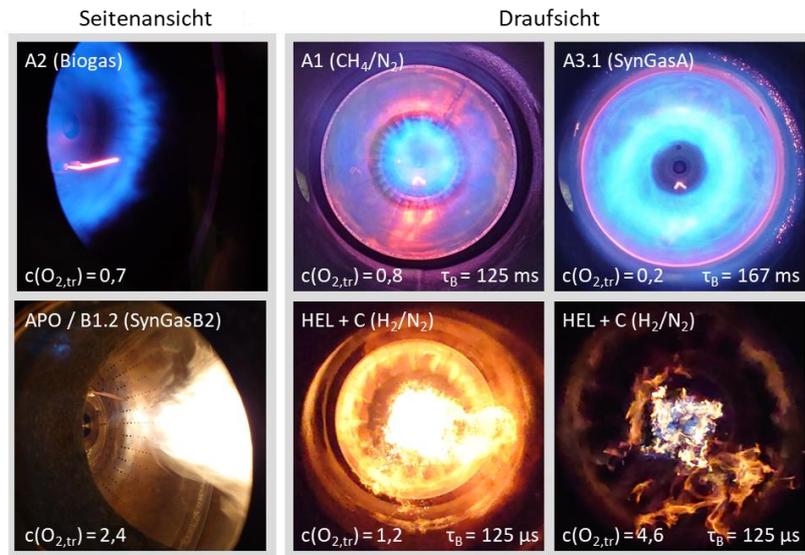


Abbildung 6.2: Fotoaufnahmen von ausgewählten Gas- (oberer Reihe) sowie Misch- und Ölfammen (untere Reihe);  $c(O_{2,tr})$ : Rest- $O_2$ -Gehalt im trockenen Abgas;  $\tau_B$ : Fotobelichtungszeit. (Quelle: GWI)

Im Ölbetrieb etablierte sich eine Sprayflamme, wie sie bei klassischen Gelbflammenbrennern zu erwarten ist. Die sich ausbildende Drallströmung bzw. die Rezirkulation reichte hier nicht aus, um heißes Abgas in die Zone der Gemischbildung derart zu rezirkulieren, dass die Flamme zunehmend vorgemischt mit bläulicher Färbung brennt. Die Rückführung von heißem Abgas aus dem Brennraum in Richtung des Spraykegels, die zur Brennstoffverdunstung beiträgt, konnte in den Versuchen nicht wie in den numerischen Berechnungen (vgl. 5.1.3) etabliert werden. Die Reaktionszone wurde zudem mit einer CCD-Kamera mit elektronischem Bildverstärker und einem Bandpassfilter für die Detektion der  $OH^*$ -Chemilumineszenz-Emission bei 308 nm durch die rückwärtige Fensteröffnung des Prüfflammrohres beobachtet. In **Abbildung 6.3** sind die über 100 Einzelaufnahmen mit 1 ms Belichtungszeit zeitlich gemittelten Aufnahmen der  $OH^*$ -Chemilumineszenz für den 100-kW-Betrieb mit Biogas und SynGasA (**obere Bildreihe**) dargestellt.

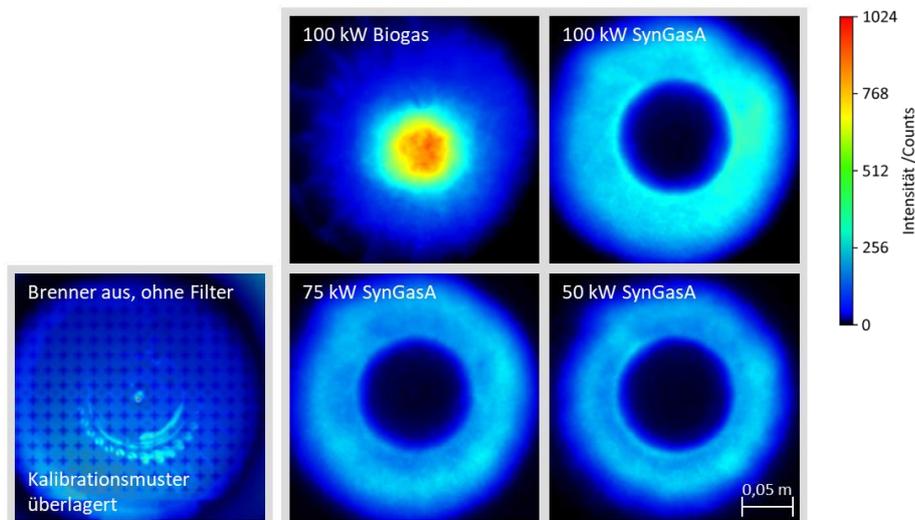
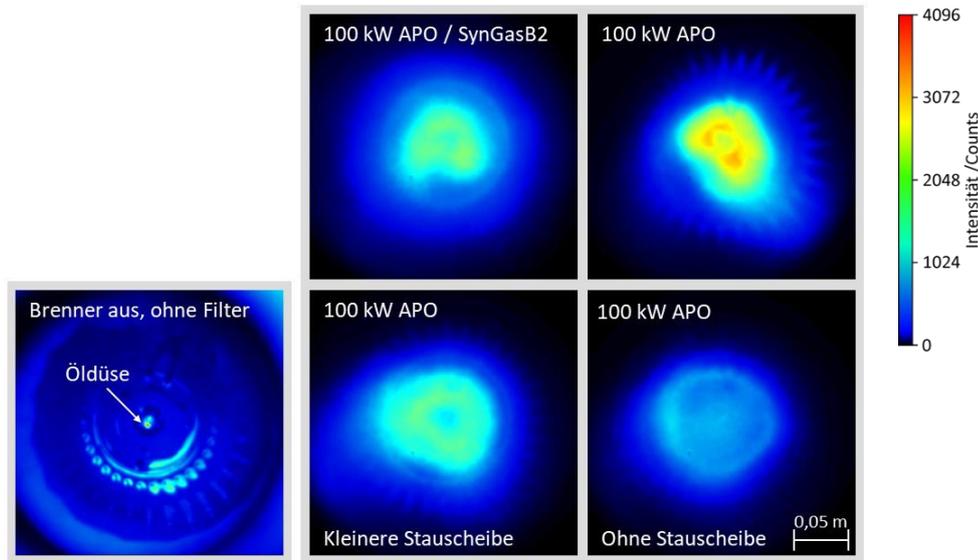


Abbildung 6.3: Zeitlich gemittelte  $OH^*$ -Chemilumineszenz-Aufnahmen im 100-kW-Biogasbetrieb sowie mit SynGasA bei unterschiedlichen Brennstoffleistungen - Draufsicht. (Quelle: GWI)

Entsprechend den Ergebnissen der numerischen Berechnungen (vgl. **5.2.2**) bildet sich die Reaktionszone in der Brennermitte (Biogas) bzw. ringförmig um die Brennermitte entlang des Luftverteilerkegels aus (SynGasA). Dessen Form und Lage bleibt auch bei einer Reduzierung der Brennerleistung um 50 % erhalten (siehe **Abbildung 4.28 - untere Bildreihe**), lediglich die Intensität der OH\*-Emission nimmt ab. Analog dazu sind in **Abbildung 6.4** OH\*-Aufnahmen für den Ölbetrieb mit APO bei 100 kW dargestellt. Die Reaktionszone ist in der Bildmitte bzw. entlang der Ausbreitungsachse mittig über der Öldüse lokalisiert. Die Flammgeometrie ändert sich geringfügig bei Verwendung einer Stauscheibe mit kleinerem Durchmesser bzw. bei Entfernen der Stauscheibe der Primärluftzufuhr.



**Abbildung 6.4:** Zeitlich gemittelte OH\*-Chemilumineszenz-Aufnahmen im 100-kW-Mischbetrieb mit APO / SynGasB2 sowie 100-kW-Ölbetrieb mit APO und unterschiedlichen Stauscheibenkonfigurationen der Öl-Einheit - Draufsicht.

Beide Maßnahmen führen zwar zu einer Beeinflussung der Primärluftströmung, konnten aber nicht zur Verbesserung der Abgasrezirkulation in der Form beitragen, dass eine ausschließlich brennernahe Brennstoffverdunstung und Verbrennung analog zu einem Blauflammenbrenner stattfindet und die Reaktionszone sich ähnlich wie im Gasbetrieb mit „SynGasA“ in Richtung des Luftverteilerkegels aufweitet. Hierzu kann zukünftig eine Modifikation der Primärluftzufuhr mit verbesserter Drallwirkung beitragen, die eine stärkere Rezirkulation des Abgases in Richtung der Öldüse ermöglicht.

### 6.2.2 Abgaszusammensetzung

Für die Analyse der Abgaszusammensetzung wurden kontinuierlich Proben über einen Partikelfilter und Abgaskühler mit Hilfe einer Sonde aus dem Abgastrakt unmittelbar am Ausgang des Prüfflammrohres abgesaugt. Die Messungen erfolgten mit konventionellen Analysegeräten (Rosemount NGA 2000 MLT4 / Binol 100 und EcoPhysics CLD 822 Sr), für die Temperaturmessungen im Abgas und Ofenraum wurden Thermoelemente vom Typ K verwendet. Die Messwerte wurden für jeden Betriebspunkt nach ausreichender Haltezeit erfasst und über ca. 30 s zeitlich gemittelt. **Abbildung 6.5** zeigt die im trockenen Abgas gemessenen CO-Konzentrationen, aufgetragen über dem Restsauerstoffgehalt für den Betrieb mit den in **Tabelle 6.1** aufgeführten Brennstoffzusammensetzungen und -kombinationen.

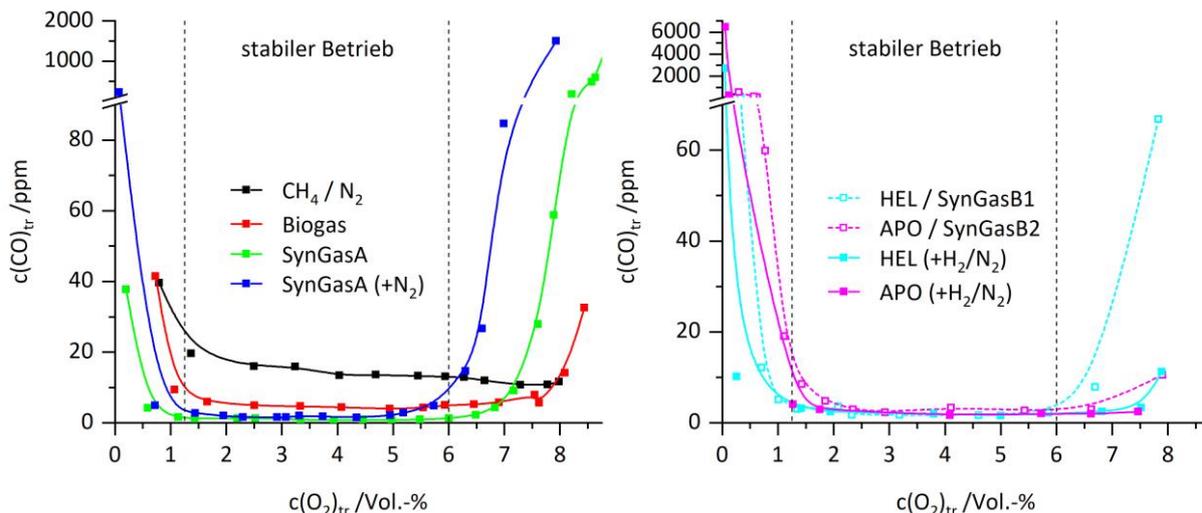


Abbildung 6.5: CO-Emissionen in Abhängigkeit vom Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas für den 100-kW Gas- (links) und Misch-/Öl-Betrieb (rechts). (Quelle: GWI)

Sowohl für den Gas- als auch den Misch- und Ölbetrieb liegen die CO-Konzentrationen im niedrigen einstelligen ppm-Bereich nahe der Nachweisgrenze, mit Ausnahme der CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>-Verbrennung, bei der die Konzentrationen über einen weiten Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt jedoch unter 20 ppm bleiben. Die Konzentrationen steigen unterhalb von ca. 1,2 Vol.-% und oberhalb von ca. 6 Vol.-% Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt in allen Fällen, vom Auftreten erster Instabilitäten, bis zum vollständigen Verlöschen der Flamme deutlich an. Innerhalb dieser Grenzen konnte sich für alle untersuchten Fälle die Verbrennung selbsterhaltend stabilisieren. In **Abbildung 6.6** sind dazu analog die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen dargestellt. Bei der Gasverbrennung zeigen sich lediglich für den Betrieb mit den höherkalorischen Gasen CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>- und Biogas signifikante Konzentrationen unterhalb von 35 ppm.

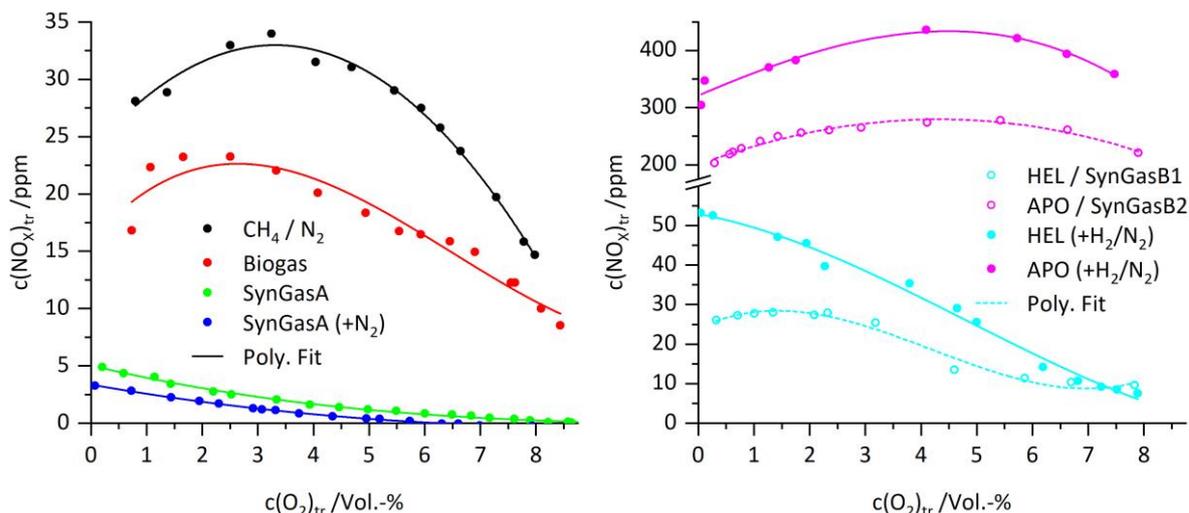


Abbildung 6.6: NO<sub>x</sub>-Emissionen in Abhängigkeit vom Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas für den 100-kW Gas- (links) und Misch-/Öl-Betrieb (rechts). (Quelle: GWI)

Im Verlauf erreichen diese ihr Maximum zwischen 1 Vol.-% und 3 Vol.-% Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt und können auf eine thermisch bedingte NO<sub>x</sub>-Bildung zurückgeführt werden. Im Misch- und Ölbetrieb ergeben sich für den Einsatz von APO jeweils signifikant höhere NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Vergleich zum Referenzfall mit HEL. Diese werden durch den erhöhten Gehalt an Brennstoffstickstoff im APO verursacht. Die relativ

niedrigen Emissionen unterhalb von 400 ppm zeigen, unter Berücksichtigung der H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Zuführung, die Wirksamkeit der gestuften Luftzufuhr und Abgasrezirkulation, die in den Voruntersuchungen zur Verbrennung von APO mit einem konventionellen Ölbrenner bei ca. 3% O<sub>2 Atr.</sub> 480 ppm bis 700 ppm aufwiesen.

### 6.2.3 Druck- und Temperaturverhalten

**Abbildung 6.7** zeigt die ermittelten Überdrücke im Frischgaszulauf unmittelbar am Brennerflansch, **links** für die Verbrennungsluft bzw. Sekundärluft und **rechts** für das Brenngas. Im Gasbetrieb steigt der Druck in der Luftstrecke von ca. 25 mbar bei nahe-stöchiometrischen Bedingungen mit zunehmendem Luftdurchsatz auf bis zu 80 mbar bei einem Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt von 8 Vol.-% an. Da im Misch- und Ölbetrieb die Sekundärluftvolumenströme konstant gehalten wurden, lagen die Drücke über den gesamten Rest-O<sub>2</sub>-Bereich bei ca. 20 mbar bzw. 15 mbar. Im Brenngaszulauf wurden mit Ausnahme der beiden Synthesegasfälle, hier bis zu 120 mbar, Drücke unterhalb von 30 mbar ermittelt. Die am Eintritt des COSTAIR-Brenners erreichten Drücke stellen im industriellen Einsatz für die Versorgung über Gebläse keine Herausforderung dar und lassen einen effizienten Betrieb zu.

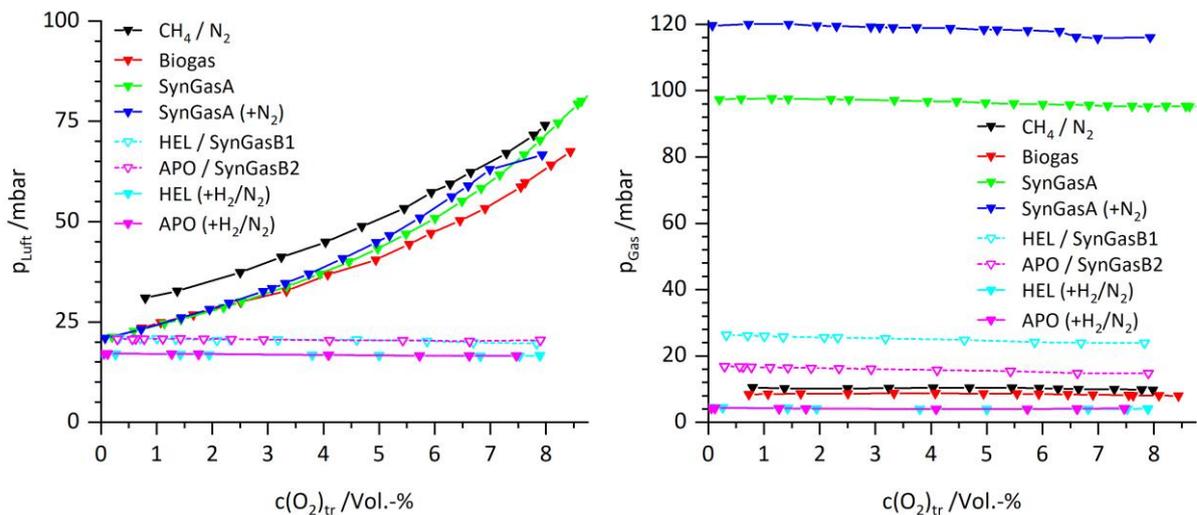


Abbildung 6.7: Drücke in der Luft- (links) und Brenngaszuleitung (rechts). (Quelle: GWI)

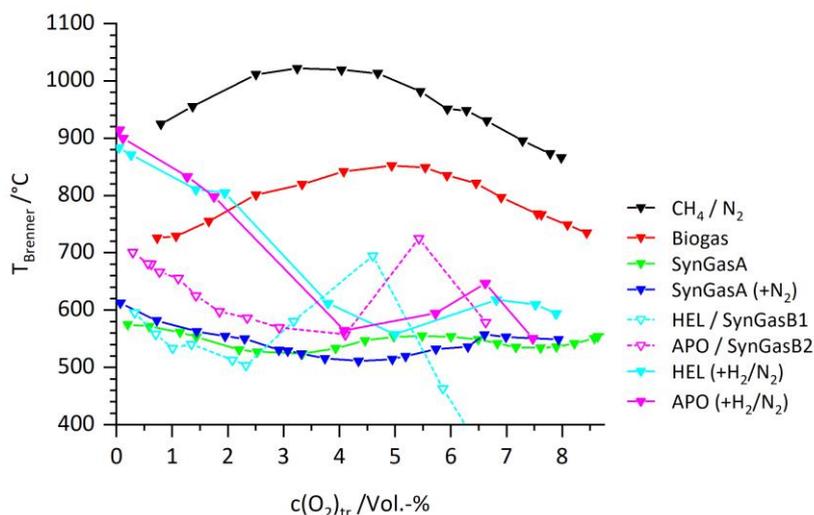


Abbildung 6.8: Brennernahe Temperaturen. (Quelle: GWI)

In **Abbildung 6.8** sind die ermittelten brennernen Temperaturen über dem Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas für alle eingesetzten Brennstoffe und -kombinationen aufgetragen. Die Temperaturen reichen bis maximal 1.000 °C im Falle der CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>-Verbrennung und liegen für alle weiteren Fälle zwischen 400 °C und 900 °C. Die Veränderung von Form und Lage der Flamme in Abhängigkeit von der Luftzahl, führt teils zu starken Änderungen im Kurvenverlauf. Eine kritische thermische Bauteilbelastung konnte für keinen der untersuchten Betriebsfälle festgestellt werden.

#### 6.2.4 Wärmeaustrag aus dem Kessel

Mit Hilfe der ermittelten Kühlwassertemperaturen und des Volumenstroms wurde die abgeführte Wärmeleistung bestimmt, siehe **Abbildung 6.9 - links**. Die zugehörigen Abgastemperaturen, ebenfalls aufgetragen über den Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas zeigt **Abbildung 6.9 – rechts**.

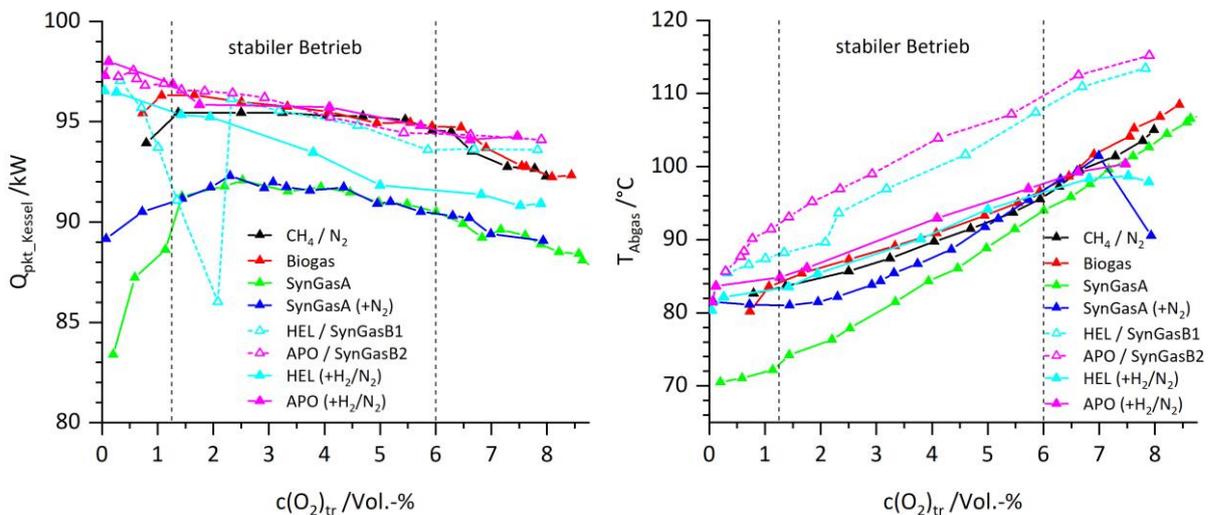


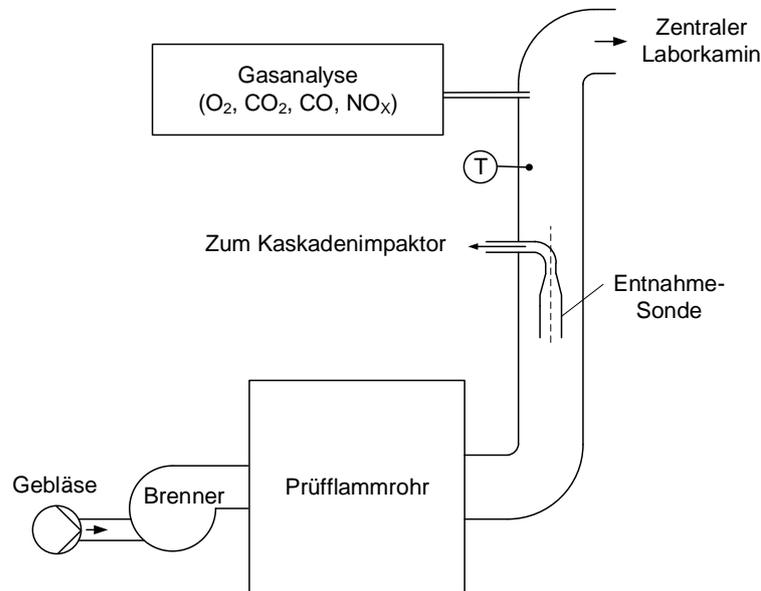
Abbildung 6.9: Wärmeaustrag (links) und Abgastemperatur (rechts). (Quelle: GWI)

Für den Luftzahlbereich, in dem jeweils eine stabile Verbrennung erreicht wird, liegen die ermittelten Wärmeleistungen zwischen 91 kW und 97 kW und die gemessenen Abgastemperaturen zwischen 70 °C und 110 °C. Mit zunehmender Luftzahl verringert sich der Wärmeaustrag und nimmt die Abgastemperatur zu, was auf einen ungünstigeren Wärmeübergang durch die verkürzte Verweilzeit des Abgases im Wärmetauscher zurückgeführt werden kann. Mit Ausnahme der Synthesegas-Fälle, die die höchsten Abgasvolumenströme aufweisen, sowie von HEL ergeben sich nahezu identische Verläufe der Wärmeleistung mit zunehmendem Rest-O<sub>2</sub>-Gehalt. Der in den Versuchen erreichte maximale Kesselwirkungsgrad von ca. 97 % zeigt, dass mit dem entwickelten Brennersystem eine effiziente Nutzung der Verbrennungswärme aus regenerativen Brennstoffen der 2. und 3. Generation in einer Kesselanwendungen prinzipiell möglich ist.

#### 6.2.5 Partikelgrößenverteilung im Betrieb mit Pyrolyseöl

Es wurden Feinstaubmessungen mit einem 14-stufigen Niederdruck-Kaskadenimpaktor für den Betrieb mit Altreifenpyrolyseöl und einer Stützfeuerung mit einem H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Gasgemisch (siehe „C“, **Tabelle 6.1**) ausgeführt. Die gesamte Brennerleistung betrug 120 kW, wobei eine Leistung von 100 kW aus der Verbrennung von Pyrolyseöl und eine Leistung von 20 kW aus der Stützfeuerung stammte.

Das Probengas wurde im Abgaskanal hinter dem Prüfflammrohr mit einer gegen die Strömung gerichteten Entnahmesonde isokinetisch aus dem Abgasstrom entnommen, siehe **Abbildung 6.10**. Das Probengas wurde in einem Verdünnner mit gereinigter und trockener Luft um den Faktor acht verdünnt, um Kondensation und Agglomeration von Partikeln im feuchten Abgas zu vermeiden, bevor es in den Kaskadenimpaktor geleitet wird.



*Abbildung 6.10: Schematische Darstellung der experimentellen Anordnung für die Partikelmessung. (Quelle: OWI)*

Im Kaskadenimpaktor werden Partikel aus dem Probengas in 14 Größenklassen auf Substratfolien abgeschieden, die jeweils vor und nach einer Messung gewogen werden. Aus den abgeschiedenen Massen wird die Partikelfracht des Abgasstromes berechnet. Die **Abbildung 6.13 - links** zeigt die Emissionen für einen stationären Betriebspunkt bei einem Restsauerstoffgehalt von 1,6 Vol.-%<sub>ATR</sub>. Aus der Aufsummierung der Beladung der einzelnen Kaskadenstufen zu Größenklassenanteilen ergeben sich die folgenden Konzentrationen: PM<sub>10</sub> = 1,6 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>, PM<sub>2,5</sub> = 1,2 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub> und PM<sub>1</sub> = 1 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>. Die gemessenen Konzentrationen sind niedriger als die zuvor an einem modifizierten Ölbrenner gemessenen, (vgl. **Kap. 4.2.3, Abbildung 4.22**). Eine Leermessung, in der das Prüfflammrohr nur mit Verbrennungsluft durchströmt wurde, zeigt eine Beladung der Kaskaden bis 0,256 µm, die teilweise über der Beladung der Messung mit Verbrennung lag. Mögliche Ursachen können die Beladung der Umgebungsluft mit Staub oder die Mobilisierung von Ablagerungen aus Prüfflammrohr und nachgeschaltetem Wärmetauscher sein. Die Messwerte > PM<sub>2,5</sub> sind dadurch mit einer großen Unsicherheit belegt.

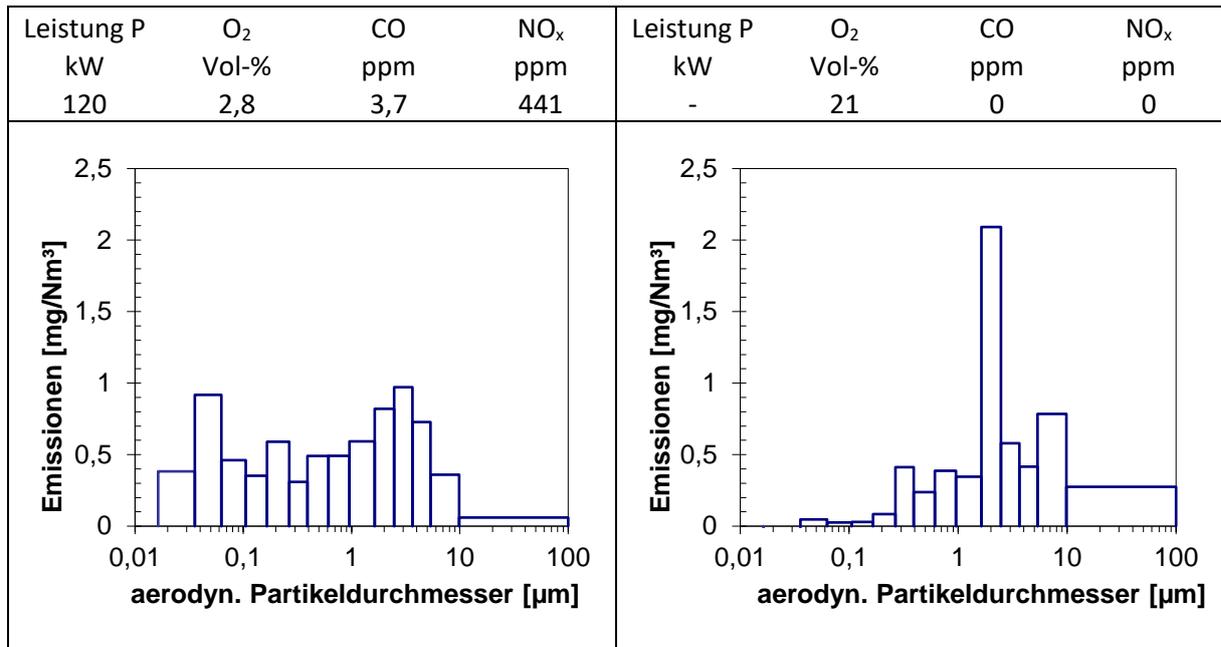


Abbildung 6.11: Partikelemissionen aus der Verbrennung von Altrefenpyrolyseöl mit Wasserstoff Stützfeuerung (links), Leermessung mit Verbrennungsluft (rechts). (Quelle: OWI)

### 6.3 Betriebserfahrung

Konzeptionell bedingt findet bei einem COSTAIR-Brenner die Verbrennungsreaktion nahe der Brennstoff- und Luftdüsen statt. Dies erfolgt vor allem durch die ausgeprägte Drallströmung des Brenngases und die damit verbundene Rezirkulation von Abgas aus dem Brennraum. Aufgrund dessen kann es zu einer hohen thermischen Belastung der Bauteile kommen. **Abbildung 6.12 a)** zeigt am Beispiel eines 300-kW-COSTAIR-Brenners [3] eine thermisch hoch-belastete Brennerkonstruktion unter Volllast. Durch die Zuführung der Verbrennungsluft im äußeren Teil der rückwärtigen Konstruktion und den brennraumseitig vorgelagerten trichterförmigen Luftverteiler, erfolgt bei der in 5.2.1 vorgestellten Brennervariante eine großflächige Kühlung durch die zugeführte Luft, wodurch eine übermäßige Erhitzung von Brennbauteilen in den Betriebsversuchen nicht festgestellt werden konnte. **Abbildung 6.12 b)** und **c)** zeigt die Brennerrückseite bzw. Thermographieaufnahmen von der Oberfläche. Die im Volllastbetrieb erfassten Oberflächentemperaturen lagen unterhalb von 90 °C.

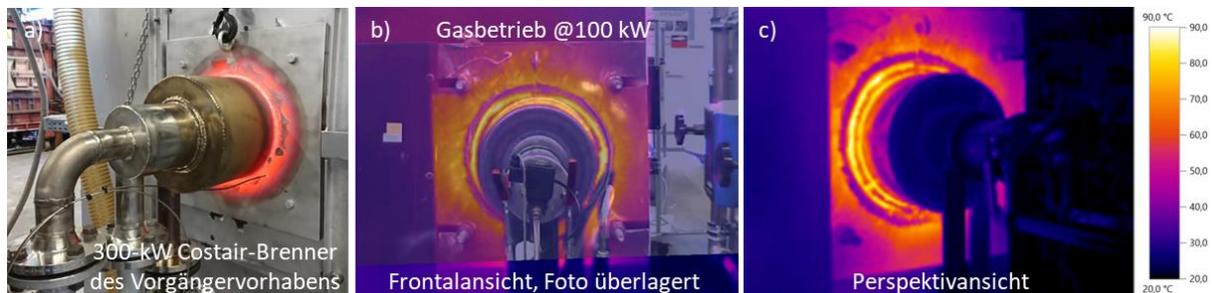
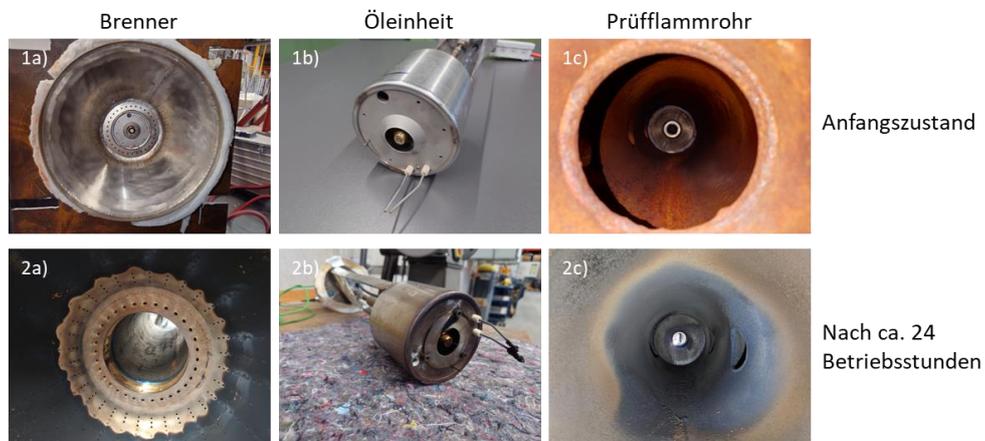


Abbildung 6.12: a) Thermisch hoch-belastete Konstruktion eines COSTAIR-Brenners [3]; b) und c) Thermographie-Aufnahmen von der Rückseite des entwickelten Brennersystems unter Volllast. (Quelle: GWI)

Bei der Erprobung des Brenners mit Pyrolyseöl trat in Abhängigkeit von den vorherrschenden Betriebsbedingungen teils eine starke Partikellast auf, die zu Ablagerungen am Brenner sowie auch an der

Brennkammerwand führte. In **Abbildung 6.13** sind die Ausgangszustände des COSTAIR-Brenners, der Öl-Einheit und der Brennerkammerwand dargestellt sowie deren jeweilige Zustände nach ca. 24 Stunden Versuchsbetrieb.



*Abbildung 6.13: a) COSTAIR-Brenner, b) Öl-Einheit und c) Brennkammer; 1) Zustand vor den Versuchen und 2) nach ca. 24 Betriebsstunden. (Quelle: GWI)*

Am Brenner traten lose Anhaftungen im äußeren Bereich des Luftverteilers sowie an den Zündelektroden der Öl-Einheit auf. Die Düsen des Luftverteilers waren nicht belegt und im inneren Bereich sowie an den Brenngasdüsen konnte entweder keine Partikellast anhaften, oder wurde durch die Gasströmung vollständig wieder abgetragen. Die Öldüse sowie die Stauscheibe der Primärluftzufuhr wiesen eine geringe Verschmutzung auf. Es konnte während der Versuche keine Beeinträchtigung des Brennerbetriebs durch Ablagerungen festgestellt werden.

## **7 Technische Analyse und ökologische Bewertung des Konzeptes im Hinblick auf mögliche Einsatzgebiete**

Die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen geben einen ersten Eindruck von der generell möglichen Nutzung nicht genormter Brennstoffe zur Herstellung von Prozesswärme. Durch die bei den Arbeiten aufgetretenen Herausforderungen ergeben sich für die Anwendung in der Industrie sowie weitere Forschung und Entwicklung folgende Herausforderungen:

### Anwendung

Der untersuchte Destillationsrückstand enthält Aschebildner. Im Anwendungsfall einer offenen Feuerung muss der Einfluss von Asche auf das Produkt und die Anlage überprüft werden. Bei Kesselfeuerungen muss geklärt werden, ob die Asche Ablagerungen in Brennraum und Wärmeübertragerrohren bildet und ob sich diese entfernen lassen. In Bezug auf Brenngase mit kritischen Spurenbestandteile wie beispielsweise  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  muss geklärt werden, inwieweit diese in Verbindung mit Wasser die Bildung von Säuren und in der Folge Korrosion an Anlagenbestandteilen verursachen können.

Die Lagerstabilität der nicht standardisierten Flüssigbrennstoffe ist nicht bekannt und sollte überprüft werden, um einen uneingeschränkten Dauerbetrieb zu gewährleisten. Die im Versuchsbetrieb aufgetretenen und bis heute nicht zufriedenstellend gelösten Probleme mit der Brennstoffförderung und Dosierung erfordern die detaillierte Überprüfung der eingesetzten Brennstoffe auf Verträglichkeit gegenüber Metallen und Polymeren. Damit ergibt sich die Möglichkeit neue gesetzliche Regelungen hinsichtlich des Geräteaufbaus, der Sicherheitstechnik und der Lagerung zur Nutzung von alternativen Brennstoffen zu formulieren. Es muss garantiert werden, dass es durch alternative Brennstoffe nicht zu Bauteil oder Dichtungsversagen und in der Folge zu Anlagenausfall oder Umweltschäden kommt. Ebenfalls muss die uneingeschränkte Funktion der Sicherheitseinrichtungen sichergestellt werden. Hierzu ist unter Umständen der Aufbau der notwendigen Fachexpertise bei den Anlagenbetreibern erforderlich.

### Ökologische Bewertung

Die Emissionsmessung zeigen, dass die in dieser Arbeit untersuchten Brennstoffe unter Einhaltung der in der 17. BImSchV festgelegten Grenzwerte zur Erzeugung von Prozesswärme genutzt werden können. Lediglich bei den Brennstoffen, die Stickstoffverbindungen enthalten, überschritten die  $\text{NO}_x$ -Emissionen den Grenzwert von 400 mg/kWh was den Einsatz einer sekundären Abgasreinigung erfordert. Da die Destillations- und Produktionsrückstände derzeit in großtechnischen Anlagen co-verbrannt werden, beschränkt sich das Treibhausgasminderungspotential auf den Entfall von Transport und die Beheizung zum Erhalt oder zur Herstellung der Pumpfähigkeit.

### Wirtschaftlichkeit

Die Nutzung der in einem Produktionsrückstand enthaltenen Energie im eigenen Produktionsprozess spart Brennstoffkosten und die kostenpflichtige Entsorgung. Weiter bietet sich dadurch die Option Stoffe, die in einem vorausgegangenem Prozess als Katalysator gedient haben, wiederzugewinnen.

### Rechtliches

Wird die Produktionsanlage von Aufsichtsbehörden als Abfallverbrennungsanlage eingestuft, hat dies Folgen für die an die Anlage gestellten Anforderungen. Die Vorgaben an die Abfallverbrennung sind in Deutschland durch die 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – 17. BImSchV umgesetzt. Den Anforderungen der 17. BImSchV unterliegen alle Abfallverbrennungsanlagen und Anlagen, die Abfälle mitverbrennen. Für jeden Brennstoff und Anwendungsfall muss eine Überprüfung der Abgasemissionen hinsichtlich der anzuwendenden Emissionsgesetzgebung stattfinden. Beispielsweise liegen die Messwerte der Staubemissionen und der Stickoxidemissionen aus den Vorversuchen mit den Brennstoffen Altreifen- und Holzpyrolyseöl über den in der 17. BImSchV festgelegten Grenzwerten.

### Potenzielle Einsatzgebiete

Thermoprozessanlagen mit offener Feuerung, z. B. Herdwagenöfen zum Erwärmen von Brammen. Für die Anwendung nicht aschehaltiger Brennstoffe ist auch der Einsatz in Strahlheizrohren denkbar. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind Kesselanwendungen zur Erzeugung von Prozessdampf oder Erwärmung von Thermalöl.

## 8 Ausblick

In Rahmen dieses Projektes konnte für exemplarische Biobrennstoffe der 2. und 3. Generation gezeigt werden, dass eine Mehrstoffverbrennung mit integrierter Vorverdampfung der Flüssigbrennstoffe prinzipiell technisch umsetzbar ist. Die erzielten Forschungsergebnisse zeigen einen technischen Ansatz für eine flexible Mehrstoffverbrennung auf, die einen Betrieb mit geringen Schadstoffemissionen unter Einhaltung der gültigen Grenzwerte ermöglichen kann. Die gewonnenen Erkenntnisse können KMU eine neue Möglichkeit für eine brennstoffflexiblen Erzeugung von Prozesswärme sowie das Erschließen neuer regenerativer Energieträger bieten und beispielsweise in Niedertemperaturanwendungen Anwendung finden.

Eine Umsetzung der hier demonstrierten Technologie in ein serienreifes Produkt innerhalb eines Zeithorizonts von ca. zwei Jahren nach Projektende wird von den beteiligten Forschungsstellen als erreichbar eingeschätzt. Die hier gesammelten Betriebserfahrungen können für die Entwicklung einer technischen Gesamtlösung einen wertvollen Beitrag leisten.

## 9 Projektplan

Nachfolgen sind die Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben für Personenmonate des wissenschaftlich-technischen Personals gemäß Beleg über Beschäftigungszeiten (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans), für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans und für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) für die beiden Forschungseinrichtungen aufgeführt.

*Tabelle 9.1: Personaleinsatz im Projektzeitraum, GWI.*

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

	2020	2021	2022	2023	gesamt
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA A	2,37	5,25	6,00	7,01	20,63
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA C	2,61	6,04	1,95	0,00	10,60

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - keine

*Tabelle 9.2: Personaleinsatz im Projektzeitraum, OWI.*

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

	2020	2021	2022	2023	gesamt
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA A	6,5	8,57	4,29	1,25	23,61
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA B	7,66	2,3	0,52	0	10,48
A.1 PM wiss.-techn. Personal HPA C	2,88	8,29	1,73	0	12,9

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - Es wurde, wie beantragt, eine Präzisionswaage im Wert von 17.184,69 EUR (netto) beschafft.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - Keine

Nachfolgend ist der Projektplan dargestellt. Das Projekt hatte eine Laufzeit von ursprünglich 30 Monaten. Diese wurde kostenneutral auf 39 Monate verlängert (05/2020 bis 07/2023), um das Projekt in vollem Umfang erfolgreich abzuschließen.

Abbildung 9.1: Zeitplan des Projektes "InteBRA".

AP / Bearb.	Projektmonat																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
<b>AP 1</b>	<b>Ermittlung von potentiellen Brennstoffen und Untersuchung der Verdampfungscharakteristik</b>																														
1.2	Festlegung einer Brennstoffmatrix mit Bio-Brennstoffen der 2. und 3. Generation und Reststoffe aus der Industrie																														
OWI																															
OWI																															
1.3	Experimentelle Charakterisierung biogener Brennstoffe der 2. und 3. Generation und Reststoffe aus der Industrie																														
OWI																															
OWI																															
1.4	Aufstellung von Verdampfungskonzepten in Abhängigkeit von den Einsatzstoffen																														
OWI																															
OWI																															
<b>AP 2</b>	<b>Voruntersuchungen zu den Verbrennungseigenschaften</b>																														
2.1	Reaktionskinetische Berechnungen, Modellierung von Aschebildungsvorgängen																														
OWI																															
OWI																															
2.2	Experimentelle Untersuchung der Partikelbildung aus der Verbrennung																														
OWI																															
OWI																															
2.3	Experimentelle Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Wassergehalte auf die Verbrennung																														
OWI																															
OWI																															
<b>AP 3</b>	<b>Entwicklung eines Bio-Mehrstoffbrenners mit integriertem Verdampfungssystem für flüssige Brennstoffe</b>																														
3.1	Konzepte zur Systemintegration und Wärmerückgewinnung, Grobauswahl																														
OWI																															
OWI																															
3.2	Numerische Untersuchungen für verschiedene Anwendungsfälle mittels CFD																														
OWI																															
OWI																															
3.3	Optimierung der Luftstufung zur Minderung der Stickoxidbildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff																														
OWI																															
OWI																															
3.4	Technische und ökonomische Bewertung der Konzepte, Auswahl eines Konzeptes für die technische Umsetzung																														
OWI																															
OWI																															
3.5	Auslegung und Konstruktion des integrierten Systems für eine 200 kW Kesselanwendung																														
OWI																															
OWI																															
<b>AP 4</b>	<b>Praktische Erprobung des Bio-Mehrstoffbrenners</b>																														
4.1	Realisierung und Anpassung des Gesamtsystems, Vorbereitung der Versuchsinfrastruktur und Aufbau einer Partikelmesstrecke sowie einer Wasserdampfzugabe																														
OWI																															
OWI																															
4.2	Inbetriebnahme und allgemeine Charakterisierung in einem Versuchsofen																														
OWI																															
OWI																															
4.3	Erprobung in einer Kesselanwendung für verschiedene Brennstoffe																														
OWI																															
OWI																															
<b>AP 5</b>	<b>Analyse der messtechnischen Ergebnisse und ökologische Bewertung</b>																														
5.1	Technische Analyse und Bewertung des Konzeptes, Ermittlung möglicher Einsatzgebiete																														
OWI																															
OWI																															
5.2	Ökologische Bewertung des Konzeptes, Ermittlung von CO <sub>2</sub> -Bilanzen																														
OWI																															
OWI																															
5.3	Erstellung von Handlungsempfehlungen																														
OWI																															
OWI																															
<b>AP 6</b>	<b>Dokumentation und Schnittstellenabgleich</b>																														
OWI																															
OWI																															

Meilenstein 1

Meilenstein 2

Meilenstein 3

Meilenstein 1: Abschluss der Brennstoffcharakterisierung.

Meilenstein 2: Festlegung des Konzeptes für die technische Umsetzung.

Meilenstein 3: Beginn der Erprobung für eine reale Anwendung.

## 10 Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen

Forschungsziel	Erzieltes Ergebnis
<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung eines rekuperativen Verdampfungskonzepts für biogene Flüssigbrennstoffe der 2. und 3. Generation sowie flüssige Rest- und Abfallstoffe.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ein Verdampfungskonzept basierend auf einer internen Rezirkulation von Verbrennungsabgas wurde umgesetzt. Außer für den Brennstoff Destillationsrückstand konnte eine teilvorgemischte Verbrennung mit Pyrolyseölen gezeigt werden.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Systemische Integration des Verdampfungskonzepts in einen COSTAIR-Brenner.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Das Verdampfungskonzept wurde in einen invertierten COSTAIR-Brenner mit einer zentralen Öldüse und umliegendem Luftverteiler integriert. Das Rezirkulationsgebiet mit heißem Abgas hat sich im Ölbetrieb nicht so eingestellt wie in den Simulationsergebnissen vorhergesagt.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens kontaminierter Brennstoffe mit hohen Wassergehalten, Untersuchung maximal möglicher Wasserbeladungen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In Vorversuchen konnten der Betrieb eines COSTAIR-Brenners mit Wassergehalten im Brenngas von bis zu 45 Vol.-% erfolgreich erprobt werden.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimiertes Brennerkonzept für die Verbrennung von Brennstoffen mit hohen gebundenen Stickstoffanteilen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine Verbrennungsluftstufung als Maßnahme zur Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen wurde implementiert. Das Minderungspotential der kontinuierlichen Luftstufung ist bei den gasförmigen Brennstoffen deutlich herausgestellt worden. Bei der Verbrennung flüssiger Brennstoffe wurde ein Primärluftanteil von 70 % für die Prozessführung benötigt. Dadurch wird das Potential der kontinuierlichen Luftstufung nicht ganz ausgeschöpft.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Untersuchung der Partikelentstehung und des Partikeltransports aus der Verbrennung flüssiger Brennstoffe und die Auswirkungen auf die Temperaturverteilung im Ofenraum.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die in der Verbrennung entstehenden Aschen werden als feine Partikel mit dem Abgas ausgetragen. Die Emissionen liegen weit unter der in der TA-Luft angegebenen Grenze von 20 mg/m<sup>3</sup><sub>Atr.</sub>.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gewährleistung eines stabilen und schadstoffarmen Betriebs sowohl mit gasförmigen, als auch flüssigen Brennstoffen sowie Kombinationen aus beiden unter anwendungsnahen Bedingungen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Der Brenner im 100-kW-Versuchsmaßstab erreichte CO-Emissionen im Abgas nahe der Detektionsgrenze für den angestrebten Luftzahlbereich mit ausgewählten Brennstoffkombinationen.</li> </ul>

## 11 Nutzen der Forschungsergebnisse

Durch die umfangreiche Expertise in den Themenbereichen Gas- und Öl wurde durch die Zusammenarbeit des Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. und der OWI Science for Fuels gGmbH das Ziel des Forschungsvorhabens vollständig erreicht und die technische Umsetzbarkeit einer schadstoffarmen Mehrstoffverbrennung biogener Brennstoffe demonstriert. Die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben stehen der Entwicklung neuer Systemlösungen für die industrielle Verbrennungstechnik zur Verfügung. Es wurden zahlreichen Maßnahmen zum Transfer der erzielten Ergebnisse in die Wirtschaft vorgenommen.

### Bisherige und im Jahr 2024 geplante Tätigkeiten zum Ergebnistransfer:

*Tabelle 11.1: Durchgeführte Transfermaßnahmen.*

Zeitraum / Termin	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
- Kick-off-Meeting: 28.05.2020 - 1. PbA-Sitzung: 14.12.2021 - 2. PbA-Sitzung: 06.12.2022 - 3. PbA-Sitzung: 24.07.2023	Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PbA)	Einbeziehung der Industrie in die Forschungsaktivitäten, Ergebnis und Wissensaustausch mit Industrie
Projektbeginn	Website (Steckbrief)	Information einer breiten Öffentlichkeit
Nach Vorliegen erster Ergebnisse	Pressemitteilungen	Bekanntmachung des Forschungsprojekts; Online, Zeitschriften
Jährlich	Tätigkeitsbericht; eigene Publikation, Website	Berichte über öffentlich geförderte Projekte des GWI und OWI
Jährlich	Fachbeirat; GWI, OWI, VDEh, DVGW, HVG-DGG, VDMA, FOGI	Wissenstransfer an Fachpublikum
Jährlich	Veröffentlichung der erzielten Projektergebnisse im Rahmen der Internetpräsenz des GWI und OWI	Schnelle und aktuelle Bekanntmachung der Ergebnisse
Alle 1 - 2 Jahre	Teilnahme an Fachmessen; GAT, E-world, Thermprocess, Aluminium, Glasstec	Wissenstransfer an Fachpublikum
Monat 2021	Bachelorarbeit (OWI)	Wissenstransfer
September 2021	30. Deutscher Flammentag	Posterbeitrag und Paper zur Vorstellung der Ergebnisse vor Fachpublikum und Diskussion (GWI)

Oktober 2021	3. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium	Vortrag und Paper zur Vorstellung der Ergebnisse vor Fachpublikum und Diskussion (GWI)
Oktober 2023	4. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium	Vortrag und Paper zur Vorstellung der Ergebnisse vor Fachpublikum und Diskussion (GWI)
Ende des Projektes	Abschlussbericht	Zusammenfassung der Ergebnisse; Veröffentlichung auf der GWI- und OWI-Homepage

Über das Projekt wurde im Rahmen der jährlichen Tätigkeitsberichte sowie der Internetpräsenzen der beteiligten Forschungsinstitute berichtet. Die Aufsichtsgremien des GWI und des OWI sowie der technische Beirat wurden regelmäßig über das laufende Projekt informiert. Darüber hinaus ist die Bereitstellung des Abschlussberichtes im Downloadbereich der Internetpräsenzen der beteiligten Forschungsinstitute geplant.

### 11.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Mehr als 40 % der erforderlichen Energie werden in Industrie und Gewerbe durch gasförmige oder flüssige Brennstoffe fossilen Ursprungs bereitgestellt. Diese Verbrauchergruppe produziert den weitaus größten Teil des deutschen Bruttoinlandsproduktes. Ein Großteil der Betriebe des produzierenden Gewerbes sind klein- und mittelständische Unternehmen, die einen erheblichen Teil der Arbeitsplätze in Deutschland sichern. Mit der Einleitung der Energiewende und dem Ziel der Dekarbonisierung der Produktionsketten, hat die ressourcenschonende Wärmebereitstellung und Einsparung von fossilen Brennstoffen höchste Bedeutung für die industrielle Landschaft in Deutschland bekommen. Mit dem Vorhaben InteBRA wird den industriellen Endverbrauchern eine Möglichkeit gegeben, neue Energieträger zu erschließen, die bisher keiner direkten energetischen Verwertung innerhalb der Produktionsketten zugeführt wurden. Zur energetischen Verwertung kommen biogene Brennstoffe der 2. und 3. Generation (Pyrolyseöle etc.), flüssige Abfallprodukte aus chemischen Herstellungsverfahren, aber auch schwachkalorische Prozessgase (Synthesegase etc.) in Frage. In deren energetischer Verwertung wird industriellen Anwendern über die Senkung der Energiekosten hinaus die Möglichkeit gegeben, kostenintensive Entsorgungspfade einzusparen. Insbesondere in der chemischen Verfahrenstechnik entstehen dadurch neue Nutzungspfade und die Möglichkeit zur direkten thermischen Verwertung und Erzeugung von Prozesswärme. Eine Vielzahl an von klein- und mittelständischen Betrieben haben verschiedenste Kessel- und Trocknungsanlagen im kleineren Leistungsbereich im Einsatz. Insbesondere im ländlichen Bereich ist eine Anschlussmöglichkeit an die Erdgasinfrastruktur nicht immer möglich. Diesen Betreibern werden alternative sowohl flüssige, als auch gasförmige Brennstoffe zugänglich gemacht und durch die Einsatzmöglichkeit von biogenen Brennstoffen zudem eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses ermöglicht. Darüber hinaus werden KMU durch die Möglichkeit der kombinierten Verbrennung flüssiger und gasförmiger Brennstoffe in die Lage versetzt, flexibel auf aktuelle Preisentwicklungen am Energiemarkt zu reagieren. Ein wichtiges Augenmerk lag im Projekt auf der Brennstoffflexibilisierung bei gleichzeitigem Erreichen einer stabilen und schadstoffarmen

Verbrennung. Es wurden Handlungsempfehlungen in Bezug auf die Aufbereitung der einzusetzenden Brennstoffe sowie Auslegungskriterien für Brennersysteme dieser Art erarbeitet.

## 11.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Das Vorhaben zielt auf drei wesentliche Aspekte für den wirtschaftlichen Betrieb von Thermoprozessanlagen in KMUs ab: die Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Steigerung der Energieeffizienz bzw. Senkung der Energiekosten sowie die Einsparung von Entsorgungspfaden. Dies kann mit Hilfe des entwickelten Mehrstoffbrennersystems ermöglicht werden. Daraus ergeben sich ökonomische und ökologische Vorteile sowohl für Betreiber von feuerungstechnischen Anlagen, als auch für Unternehmen in denen Rest- und Abfallstoffe aus den verfahrenstechnischen Produktionsanlagen anfallen, wie z. B. in der chemischen Industrie. Die Bedeutung von biogenen Pyrolyseölen wurde auch von der Industrie erkannt. So existiert seit 2017 bereits ein normativer Rahmen für die Anforderungen und die Verwendung [28]. Das Vorliegen dieser Norm stellt für Anlagenbauer und Betreiber die Grundlage dar, in die Technologien zur Nutzung des Energieträgers zu investieren. Vor dem Hintergrund der CO<sub>2</sub>-Zertifizierung werden mittel- und langfristig die Ausgaben für die Betreiber von feuerungstechnischen Anlagen signifikant zunehmen. Das Emissionshandelssystem (EU-EHS) [29] bewirkt durch die Verknappung von Zertifikaten indirekt eine stetige Preiserhöhung pro emittierte CO<sub>2</sub>-Tonne in den kommenden Jahren. Aktuell werden die von der Bundesregierung gesetzten Ziele zur CO<sub>2</sub>-Reduktion (z. B. für das Jahr 2020) nur unzureichend von den einzelnen Sektoren umgesetzt. Als mögliches Instrument zur Forcierung könnten die Kosten pro emittierte CO<sub>2</sub>-Tonne zukünftig ansteigen. In diesem Zusammenhang bietet die Mehrstoffverbrennung gerade klein- und mittelständischen Unternehmen die Möglichkeit CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit Betriebskosten zu senken. Zudem ermöglicht der Einsatz von biogenen flüssigen Brennstoffen den Betreibern von gasbefeuerten Anlagen die Möglichkeit schneller und flexibler auf Veränderungen am Brennstoffmarkt zu reagieren. Die gewonnenen Erkenntnisse, aber auch die Grenzen der Mehrstoffverbrennung, können auf eine Vielzahl von Anwendungen der industriellen Wärmebereitstellung übertragen werden. Betreiber feuerungstechnischer Anlagen können direkt von den im Projekt erzielten Ergebnissen profitieren oder sich an der technischen Vorgehensweise des Projektes orientieren. Im Rahmen von InteBRA wurde die Verdampfung der Flüssigbrennstoffe mit Hilfe rekuperierter Abgaswärme direkt in das Brennerkonzept integriert. Diese Maßnahme reduziert den Platzbedarf und erleichtert somit die Umsetzung beim Einsatz als Modernisierungsmaßnahme für Anlagen im Bestand. Des Weiteren kann durch die Rekuperation von Abgaswärme gleichzeitig die Energieeffizienz gesteigert werden. Der Einsatz des neuen Brennerkonzepts kann eine signifikante Reduzierung der Betriebskosten für KMU ermöglichen. Durch die Übertragbarkeit auf eine Vielzahl von Anwendungen in der Thermoprozesstechnik kann die Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen, welche in Deutschland, aber auch weltweit verkauft werden, angestoßen werden. Durch die Weiterentwicklung der Mehrstoffbrennertechnik können sich Hersteller feuerungstechnischer Anlagen insbesondere Brennerhersteller Vorteile im weltweiten Wettbewerb erarbeiten. Darüber hinaus profitieren Unternehmen mit verfahrenstechnischen Prozessen, bei denen mineralische Substrate als Nebenprodukt anfallen. Z. B. beim Recycling von Altpolymeren, bei dem unter anderem Pyrolyseöl als Nebenprodukt anfällt. Die technischen Feuerungsprozesse müssen bei Änderung der Betriebsparameter, wie z. B. eine

Änderung der Gaszusammensetzung oder einer Änderung von Gas- bzw. Luftmenge, konstante Ofenraumbedingungen gewährleisten, damit die erforderlichen Produktqualitäten erzielt werden. Des Weiteren sind Betreiber von Verbrennungsanlagen verpflichtet Emissionsgrenzwerte für Schadgase, wie  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  gemäß der TA Luft [17] einzuhalten. Innerhalb von InteBRA wurden diesbezüglich numerische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt und die Veränderungen des Verbrennungsprozesses aufgrund des veränderten Brennstoffs aufgezeigt. Durch die umfassende Analyse z. B. von Ausbrand, Wärmeübertragung, Schadstoffemissionen, Brennermodifikationen können die Anforderungen an Thermoprozessanlagenbauer und -betreiber kommuniziert und Risiken reduziert werden. Damit kann die Bereitschaft, dieses Konzept in die industrielle Praxis umzusetzen, steigen. Durch die Klärung dieser Fragen können die beteiligten Partner (v. a. Zulieferindustrie und Anlagenbauer) auch in anderen Industriezweigen neue Aufgabenfelder erschließen, neue zugeschnittene Produkte mitentwickeln oder optimieren und somit ihre Wettbewerbsfähigkeit sichern und sich gegenüber der Konkurrenz durch fundiertes praktisches Wissen und Erfahrung abgrenzen. Die im Rahmen dieses Projektes zu erarbeitenden Ergebnisse und Erkenntnisse leisten einen wertvollen Beitrag, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen KMU in Bezug auf die Nutzung von regenerativen Brennstoffen zu erhalten und auszubauen.

### 11.3 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die Voraussetzungen für eine schnelle Umsetzung der Forschungsergebnisse stehen nach heutigem Erkenntnisstand günstig. Steigende Energiepreise und der politische Wille THG-Emissionen zu reduzieren, fördern den industriellen Einsatz von flexiblen Mehrstoffbrennern. Aus diesem Grund ist damit zu rechnen, dass Hersteller entsprechende Brenner in einem Zeithorizont von ca. 2 Jahren zur Marktreife bringen können. Im Laufe des Projektes erzielte Teilergebnisse (z. B. zur Brennstoffcharakteristik und Verdampfung) können direkt in die industrielle Praxis übertragen werden. Direkte Anwender sind daher Brennerhersteller (Fachgebiet Verfahrenstechnik, Thermoprozesstechnik, Wirtschaftszweig Maschinenbau). Potenzielle Anwender der angestrebten Brennertechnik kommen aus allen Fachgebieten und Wirtschaftszweigen der Thermoprozesstechnik. Die Nutzung der FuE-Ergebnisse kann branchenübergreifend erfolgen und vor allem folgenden Nutzergruppen technische und wirtschaftliche Vorteile bringen:

- Es werden neue Brennstoffe für industrielle Kesselanwendungen und Thermoprozesse nutzbar gemacht, die bisher entsorgt werden mussten und bisher nur über eine Zudosierung (Spray) bzw. Stützflammen mit konventionellen Brennstoffen, häufig Erdgas, thermisch verwertbar sind. Durch die Vorverdampfung im Brennraum wird eine Stützflamme und ein konventioneller (fossiler) Brennstoffeinsatz überflüssig.
- Dadurch ist eine die Einsparung von Komponenten und Reduzierung der Systemkosten im Vergleich zu bisherigen Mehrstoffbrennerkonzepten möglich.
- Hoher Wirkungsgrad durch Rekuperation von Abgaswärme für die Vorverdampfung.

Die Brennstoffflexibilität wird erhöht, somit können Brennstoffkosten sowie auch Entsorgungskosten für gasförmige und flüssige Rest- und Abfallstoffe eingespart werden. Es konnte gezeigt werden, dass das verwendete Brennerkonzept eine geringe technische Komplexität aufweist und somit auch die Kosten für

die Umsetzung im industriellen Maßstab geringgehalten werden können. Durch die Zusammenführung von Verdampfer und Brenner in einem integralen Konzept können die Kosten für einen externen Verdampfer eingespart werden. Für die Verdampfung wird die notwendige Wärme innerhalb des Brennraums rekuperiert, ohne dass eine aufwändige Abgasrückführung zu berücksichtigen ist. Somit sind geringe Kosten für eine industrielle Umsetzung des integralen Systems zu erwarten. Die rekuperative Nutzung der bisher über den Brenner ausgetragenen Abwärme trägt zudem zur Effizienzsteigerung und Senkung der Betriebskosten bei.

## 12 Veröffentlichungen

Das Projekt wurde während seiner Laufzeit auf internationalen Konferenzen vorgestellt und es wurden Artikel in Fachzeitschriften publiziert. Nachfolgend sind die aus dem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichungen einschließlich der abgeschlossenen studentischen Arbeiten in chronologischer Reihenfolge aufgeführt:

- Rauschardt, M.: „Charakterisierung von Brennstoffen“, Bachelorarbeit, FH Aachen / OWI Science for Fuels gGmbH, Aachen / Herzogenrath, 2021.
- Röder, M., Kaiser, J., Möntmann, D., Grote, M., Giese, A., Görner, K.: „Entwicklung eines Brennersystems für den Einsatz regenerativer Brennstoffe der 3. Generation – Untersuchung des Verbrennungsverhaltens bei hohen Wassergehalten“, 30. Deutscher Flammentag, 28. - 29. September 2021, Leibniz Universität.
- Kaiser, J., Röder, M., Möntmann, D., Grote, M., Giese, A., Görner, K.: „Entwicklung eines Brennersystems für regenerative Brennstoffe der 3. Generation mit integriertem Verdampfungskonzept für Flüssigbrennstoffe“, 3. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium, 7. - 8. Oktober 2021, Universität RWTH Aachen.
- Röder, D., Möntmann, M., Grote, M., Giese, A.: „Brennersystem für den Einsatz regenerativer Gas- und Flüssigbrennstoffe der 3. Generation“, 4. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium, 17. - 18. Oktober 2023, Universität RWTH Aachen.

## **Danksagung**

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei den Partnern des Projektbegleitenden Ausschusses für deren Mitarbeit und unentgeltliche Bereitstellung von Material, Personal sowie technischer und fachlicher Unterstützung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die Bereitstellung der finanziellen Mittel aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Die durchführenden Forschungsvereinigungen bedanken sich bei der Friedrich Ley GmbH sowie der MEKU Metal Processing GmbH für die Unterstützung während der Entwicklung und die Herstellung des Funktionsmusters.

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: ENDENERGIEVERBRAUCH NACH SEKTOREN LINKS UND ANTEIL DER ENERGIETRÄGER AM ENDENERGIEVERBRAUCH IM INDUSTRIESEKTOR IM JAHR 2016 [1].	5
ABBILDUNG 2.2: VERGLEICH EINER PFLANZENÖLFLAMME (LINKS) MIT EINER PYROLYSEÖLFLAMME (ALTHOLZ) (RECHTS) [12]. DEUTLICH SIND IN DER PYROLYSEÖLFLAMME DIE FESTEN BESTANDTEILE ZU ERKENNEN.	8
ABBILDUNG 2.3: VERDAMPFEROBERFLÄCHE EINES VORMISCHBRENNERS NACH 100 BETRIEBSSTUNDEN MIT A) HEIZÖL EL SCHWEFELARM +5 % FAME UND B) NACH ANHEBUNG DER VERDAMPFERTEMPERATUR [15].	10
ABBILDUNG 2.4: BRENNERKONSTRUKTION AUSGELEGT FÜR EINE THERMISCHE LEISTUNG VON 300 kW [3].	10
ABBILDUNG 2.5: ABGASEMISSIONEN GEMESSEN IM VERSUCHSOFFENAUSLASS BEI 300 kW [3].	10
ABBILDUNG 4.1: FARBLICHE ERSCHEINUNG DER EINGESETZTEN BRENNSTOFFE. (QUELLE: OWI)	18
ABBILDUNG 4.2: TGA MIT GEÖFFNETEM OFEN (LINKS), ALUMINIUMTIEGEL (100 µL, RECHTS). (QUELLE: OWI)	20
ABBILDUNG 4.3: PROBENMASSE ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG VON ALTREIFENPYROLYSEÖL IN O <sub>2</sub> . (QUELLE: OWI)	21
ABBILDUNG 4.4: PROBENMASSE ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG VON ALTREIFENPYROLYSEÖL IN O <sub>2</sub> IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN N <sub>2</sub> . (QUELLE: OWI)	21
ABBILDUNG 4.5: PROBENMASSE ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG VON GLYCERIN IN O <sub>2</sub> IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN N <sub>2</sub> . (QUELLE: OWI)	21
ABBILDUNG 4.6: PROBENMASSE ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG VON UCOME B-WARE IN O <sub>2</sub> IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN N <sub>2</sub> . (QUELLE: OWI)	21
ABBILDUNG 4.7: PROBENMASSE ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG EINES DESTILLATIONSRÜCKSTANDS IN O <sub>2</sub> IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN N <sub>2</sub> . (QUELLE: OWI)	22
ABBILDUNG 4.8: PROBENMASSE ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG EINES METHANOL - KOHLENWASSERSTOFFGEMISCHES IN O <sub>2</sub> IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN N <sub>2</sub> . (QUELLE: OWI)	22
ABBILDUNG 4.9: PROBENMASSE ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG EINES DESTILLATIONSRÜCKSTANDS IN O <sub>2</sub> IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN N <sub>2</sub> . (QUELLE: OWI)	22
ABBILDUNG 4.10: PROBENKÖRPER DES TIEGELVERDAMPFERS. (QUELLE: OWI)	23
ABBILDUNG 4.11: VERSUCHSAPPARATUR ZUR BRENNSTOFFVERDAMPFUNG. (QUELLE: OWI)	24
ABBILDUNG 4.12: RING ZUR GASEINLEITUNG ÜBER DEM PROBEKÖRPER. (QUELLE: OWI)	24
ABBILDUNG 4.13: RÜCKSTAND AUS DER VERDAMPFUNG VON HEIZÖL EXTRA LEICHT (HEL) FÜR VERSCHIEDENE TEMPERATUREN. (QUELLE: OWI)	25
ABBILDUNG 4.14.: RÜCKSTAND AUS DER VERDAMPFUNG VON HYDRIERTEM PFLANZENÖL (HVO) FÜR VERSCHIEDENE TEMPERATUREN. (QUELLE: OWI)	25
ABBILDUNG 4.15: RÜCKSTAND AUS DER VERDAMPFUNG EINES MEOH- GEMISCHES (OBEN), UCOME B-WARE (MITTE) UND VON GLYCERIN (UNTEN,) FÜR VERSCHIEDENE TEMPERATUREN. (QUELLE: OWI)	26
ABBILDUNG 4.16: RÜCKSTAND AUS DER VERDAMPFUNG VON ALTREIFENPYROLYSEÖL FÜR VERSCHIEDENE TEMPERATUREN. VERDUNSTUNG IN LUFT IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN STICKSTOFF. (QUELLE: OWI)	26
ABBILDUNG 4.17: ABLAGERUNGSMENGEN VON ALTREIFENPYROLYSEÖL ÜBER DER TIEGELTEMPERATUR. VERDUNSTUNG IN LUFT IM VERGLEICH ZUR VERDUNSTUNG IN STICKSTOFF. (QUELLE: OWI)	27
ABBILDUNG 4.18: DICHTEN DER BRENNSTOFFE ÜBER TEMPERATUR. (QUELLE: OWI)	28
ABBILDUNG 4.19: DYNAMISCHE VISKOSITÄT DER BRENNSTOFFE ÜBER DER TEMPERATUR. (QUELLE: OWI)	28
ABBILDUNG 4.20: EMISSIONEN, HEL (LINKS) UND HVO (RECHTS). (QUELLE: OWI)	29
ABBILDUNG 4.21: EMISSIONEN, ALTREIFENPYROLYSEÖL (APO, LINKS) UND HOLZPYROLYSEÖL (FPBO, RECHTS). (QUELLE: OWI)	30
ABBILDUNG 4.22: EMISSIONEN NACH OPTIMIERUNG, ALTREIFENPYROLYSEÖL (APO). (QUELLE: OWI)	31
ABBILDUNG 4.23: SCHNITTANSICHT DES 100 kW COSTAIR-BRENNERS (FH: FLAMMENHALTER, DZ: DRALLERZEUGER, LV: LUFTVERTEILER) [3].	32

ABBILDUNG 4.24: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VERSUCHSAUFBAUS FÜR DIE UNTERSUCHUNG DES VERBRENNUNGSVERHALTENS VON SCHWACHKALORISCHEN BRENNGASEN MIT HOHEN WASSERGEHALTEN (GE: GASERHITZER, DE: DAMPFERZEUGER, DZ: DRALLERZEUGER, LV: LUFTVERTEILER). (QUELLE: GWI) .....	33
ABBILDUNG 4.25: COSTAIR-BRENNER IM 100 kW-SCHWACHGASBETRIEB MIT 45 VOL.-% WASSERANTEIL IM BRENNGAS; BLICK AUF DEN FLAMMENHALTER DURCH DIE SEITLICHE OFENRAUMKLAPPE (LINKS) UND BRENNERRÜCKANSICHT (RECHTS). (QUELLE: GWI)	34
ABBILDUNG 4.26: CO- UND NO <sub>x</sub> -KONZENTRATION IM ABGAS IN ABHÄNGIGKEIT VOM RESTSAUERSTOFFGEGHALT FÜR UNTERSCHIEDLICHE WASSERANTEILE IM BRENNGAS. (QUELLE: GWI) .....	35
ABBILDUNG 4.27: TEMPERATUREN IN BRENNERNÄHE UND ABGAS FÜR VERSCHIEDENE WASSERGEHALTE IM BRENNGAS. (QUELLE: GWI) .....	35
ABBILDUNG 4.28: OH*-CHEMILUMINESZENZ BEI UNTERSCHIEDLICHEN WASSERGEHALTEN IM BRENNGAS; AUFNAHMEN DURCH EINEN OPTISCHEN ZUGANG IN DER OFENRÜCKWAND; BRENNERDRAUFSICHT (ROTE MARKIERUNG - BEGRENZUNG FLAMMENHALTER, WEIß - ZENTRALER STAUKÖRPER / LUFTVERTEILER). (QUELLE: GWI) .....	36
ABBILDUNG 5.1: 3D-CAD-MODELLE DER DESIGN-VARIANTEN FÜR DEN MEHRSTOFFBRENNER. 1) VARIANTE 1 MIT ZENTRALEM LUFTVERTEILER, 2) VARIANTE 2 MIT ZENTRALER BRENNSTOFFDÜSE – SCHNITTANSICHT. (QUELLE: GWI) .....	37
ABBILDUNG 5.2: CFD-GEOMETRIEN - 1) VIERTELSEGMENT DES BRENNRAUMS; DETAILANSICHTEN DES FLAMMENHALTERS MIT DEN EINLAUFVOLUMINA FÜR BRENNGAS UND LUFT - 2A) ZU VARIANTE 1 UND 2B) ZU VARIANTE 2. (QUELLE: GWI).....	38
ABBILDUNG 5.3: 2D-VERTEILUNGEN DER ABSOLUT- (OBEN, I.) UND RÜCKSTRÖMGESCHWINDIGKEIT (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN – VARIANTE 1. (QUELLE: GWI) .....	39
ABBILDUNG 5.4: 2D-VERTEILUNGEN DER ABSOLUT- (OBEN, I.) UND GESCHWINDIGKEIT IN LÄNGSRICHTUNG (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN – VARIANTE 1 (QUELLE: GWI).....	39
ABBILDUNG 5.5: 2D-VERTEILUNGEN DER TEMPERATUR (OBEN, I.) UND CO-KONZENTRATION (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN – VARIANTE 1 (QUELLE: GWI).....	39
ABBILDUNG 5.6: 2D-VERTEILUNGEN DER ABSOLUT- (OBEN, I.) UND RÜCKSTRÖMGESCHWINDIGKEIT (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN – VARIANTE 2. (QUELLE: GWI) .....	40
ABBILDUNG 5.7: 2D-VERTEILUNGEN DER ABSOLUT- (OBEN, I.) UND GESCHWINDIGKEIT IN LÄNGSRICHTUNG (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN – VARIANTE 2 (QUELLE: GWI).....	40
ABBILDUNG 5.8: 2D-VERTEILUNGEN DER TEMPERATUR (OBEN, I.) UND CO-KONZENTRATION (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN – VARIANTE 2 (QUELLE: GWI).....	40
ABBILDUNG 5.9: 2D-VERTEILUNGEN DER TEMPERATUR IM GESAMTEN OFENRAUM - VERGLEICH ZWISCHEN VARIANTE 1 (OBEN, 1) UND VARIANTE 2 (UNTEN, 2). (QUELLE: GWI) .....	41
ABBILDUNG 5.10: 2D-VERTEILUNGEN DER RÜCKSTRÖMGESCHWINDIGKEIT IM GESAMTEN OFENRAUM - VERGLEICH ZWISCHEN VARIANTE 1 (OBEN, 1) UND VARIANTE 2 (UNTEN, 2). (QUELLE: GWI) .....	41
ABBILDUNG 5.11: KONZEPT MIT 4 RADIAL VERTEILTEN BRENNSTOFFDÜSEN. (QUELLE: OWI) .....	42
ABBILDUNG 5.12: INVERTIERTER BRENNER MIT ZENTRALER BRENNSTOFFEINDÜSUNG. (QUELLE: OWI) .....	42
ABBILDUNG 5.13: STRÖMUNGSPROFIL INVERTIERTER BRENNER, 100 kW PYROLYSEÖL, LUFTVERHÄLTNISS 1,2, 70 % PRIMÄRLUFT, DRALLWINKEL PRIMÄRLUFT 50°. (QUELLE: OWI) .....	43
ABBILDUNG 5.14: INVERTIERTER BRENNER STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN (LINKS), VOLUMENANTEIL NICHT VERDUNSTETER BRENNSTOFF (RECHTS). (QUELLE: OWI) .....	43
ABBILDUNG 5.15: VOLUMENANTEIL VERDUNSTETER BRENNSTOFF (LINKS), FLAMMENTEMPERATUREN (RECHTS). (QUELLE: OWI) .....	44
ABBILDUNG 5.16: 3D-CAD-MODELL DER FINALEN BRENNERKONSTRUKTION. (QUELLE: GWI).....	44
ABBILDUNG 5.17: CFD-GEOMETRIE FÜR DIE NUMERISCHE UNTERSUCHUNG DER FINALEN BRENNERKONSTRUKTION. (QUELLE: GWI) ..	45
ABBILDUNG 5.18: 2D-VERTEILUNGEN DER ABSOLUT- (OBEN, I.) UND RÜCKSTRÖMGESCHWINDIGKEIT (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN. (QUELLE: GWI) .....	46
ABBILDUNG 5.19: 2D-VERTEILUNGEN DER ABSOLUT- (OBEN, I.) UND GESCHWINDIGKEIT IN LÄNGSRICHTUNG (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN. (QUELLE: GWI) .....	46
ABBILDUNG 5.20: 2D-VERTEILUNGEN DER TEMPERATUR (OBEN, I.) UND CO-KONZENTRATION (UNTEN, II.) FÜR DEN BETRIEB BEI 100 kW UND $\lambda = 1,1$ MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN. (QUELLE: GWI) .....	46
ABBILDUNG 5.21: 2D-VERTEILUNGEN DER TEMPERATUR IM OFENRAUM FÜR DIE ANGEPAßTE DÜSEN-GEOMETRIE (OBEN, I.) UND DIE VORVERSION (UNTEN, II.; VGL. 5.1.1) FÜR DEN BETRIEB MIT UNTERSCHIEDLICHEN BRENNGASEN. (QUELLE: GWI) .....	47

ABBILDUNG 6.1: VERSUCHSAUFBAU AN EINEM 200-kW-PRÜFFLAMMROHR IM TECHNIKUM DES GWI; 100-kW-FUNKTIONSMUSTER MIT ZÜNDELEKTRODEN (ZE) UND OPTISCHEM ZUGANG FÜR DIE FLAMMENÜBERWACHUNG (UV). (QUELLE: GWI) .....	48
ABBILDUNG 6.2: FOTOAUFNAHMEN VON AUSGEWÄHLTEN GAS- (OBERER REIHE) SOWIE MISCH- UND ÖLFLAMMEN (UNTERE REIHE); $c(O_{2,TR})$ : REST-O <sub>2</sub> -GEHALT IM TROCKENEN ABGAS; T <sub>B</sub> : FOTOBELICHTUNGSZEIT. (QUELLE: GWI) .....	50
ABBILDUNG 6.3: ZEITLICH GEMITTELTE OH*-CHEMILUMINESZENZ-AUFNAHMEN IM 100-kW-BIOPGASBETRIEB SOWIE MIT SYNGASA BEI UNTERSCHIEDLICHEN BRENNSTOFFLEISTUNGEN - DRAUFSICHT. (QUELLE: GWI) .....	50
ABBILDUNG 6.4: ZEITLICH GEMITTELTE OH*-CHEMILUMINESZENZ-AUFNAHMEN IM 100-kW-MISCHBETRIEB MIT APO / SYNGASB2 SOWIE 100-kW-ÖLBETRIEB MIT APO UND UNTERSCHIEDLICHEN STAUSCHEIBENKONFIGURATIONEN DER ÖL-EINHEIT - DRAUFSICHT. ....	51
ABBILDUNG 6.5: CO-EMISSIONEN IN ABHÄNGIGKEIT VOM REST-O <sub>2</sub> -GEHALT IM ABGAS FÜR DEN 100-kW GAS- (LINKS) UND MISCH-/ÖL-BETRIEB (RECHTS). (QUELLE: GWI) .....	52
ABBILDUNG 6.6: NO <sub>x</sub> -EMISSIONEN IN ABHÄNGIGKEIT VOM REST-O <sub>2</sub> -GEHALT IM ABGAS FÜR DEN 100-kW GAS- (LINKS) UND MISCH-/ÖL-BETRIEB (RECHTS). (QUELLE: GWI) .....	52
ABBILDUNG 6.7: DRÜCKE IN DER LUFT- (LINKS) UND BRENNGASZULEITUNG (RECHTS). (QUELLE: GWI) .....	53
ABBILDUNG 6.8: BRENNERNAHE TEMPERATUREN. (QUELLE: GWI) .....	53
ABBILDUNG 6.9: WÄRMEAUSTRAG (LINKS) UND ABGASTEMPERATUR (RECHTS). (QUELLE: GWI) .....	54
ABBILDUNG 6.10: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER EXPERIMENTELLEN ANORDNUNG FÜR DIE PARTIKELMESSUNG. (QUELLE: OWI) ..	55
ABBILDUNG 6.11: PARTIKELMISSIONEN AUS DER VERBRENNUNG VON ALTREIFENPYROLYSEÖL MIT WASSERSTOFF STÜTZFEUERUNG (LINKS), LEERMESSUNG MIT VERBRENNUNGSLUFT (RECHTS). (QUELLE: OWI) .....	56
ABBILDUNG 6.12: A) THERMISCH HOCH-BELASTETE KONSTRUKTION EINES COSTAIR-BRENNERS [3]; B) UND C) THERMOGRAPHIE-AUFNAHMEN VON DER RÜCKSEITE DES ENTWICKELTEN BRENNERSYSTEMS UNTER VOLLAST. (QUELLE: GWI) .....	56
ABBILDUNG 6.13: A) COSTAIR-BRENNER, B) ÖL-EINHEIT UND C) BRENNKAMMER; 1) ZUSTAND VOR DEN VERSUCHEN UND 2) NACH CA. 24 BETRIEBSSTUNDEN. (QUELLE: GWI) .....	57
ABBILDUNG 9.1: ZEITPLAN DES PROJEKTES "INTEBRA" .....	62

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1: ZUSAMMENSETZUNG VERSCHIEDENER BRENNSTOFFE UND RÜCKSTANDSÖLE IM VERGLEICH ZU HEIZÖL EL UND PFLANZENÖL. .....	9
TABELLE 4.1: AUFLISTUNG DER EIGESetzten BRENNSTOFFE. ....	17
TABELLE 4.2: FESTGELEGTE BRENNSTOFFMATRIX FÜR FLÜSSIGE BRENNSTOFFE. ....	18
TABELLE 4.3: ZUSAMMENSETZUNGEN DER AUSGEWÄHLTEN BRENNGASE. ....	19
TABELLE 4.4: EIGENSCHAFTEN DER AUSGEWÄHLTEN BRENNGASE. ....	19
TABELLE 4.5: ABGASEMISSIONEN BEI CO-VERBRENNUNG MIT ERDGAS. (QUELLE: OWI).....	32
TABELLE 4.6: BRENNERBETRIEBSPARAMETER. ....	34
TABELLE 6.1: VERWENDETE BRENNGASZUSAMMENSETZUNGEN FÜR DEN GAS-, MISCH- UND GESTÜTZTEN ÖLBETRIEB. ....	49
TABELLE 9.1: PERSONALEINSATZ IM PROJEKTZEITRAUM, GWI. ....	61
TABELLE 9.2: PERSONALEINSATZ IM PROJEKTZEITRAUM, OWI. ....	61
TABELLE 11.1: DURCHGEFÜHRTE TRANSFERMAßNAHMEN. ....	64

## Literaturverzeichnis

- [1] AG Energiebilanzen e.V., <https://ag-energiebilanzen.de/9-0-Energieflussbilder.html>
- [2] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.: „Klimapfade für Deutschland“, BDI-Handlungsempfehlungen zur Studie (2018)
- [3] AiF-Projekt, IGF-Förderkennzeichen 18188 N: „Entwicklung eines Kombi-Biobrennstoffbrenners zur Erzeugung industrieller Prozesswärme - Kombi-Brenner für flüssige und gasförmige Biobrennstoffe“ (Kombibrenner für biogene Brennstoffe), Abschlussbericht GWI/OWI (2018)
- [4] EU, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (2009)
- [5] Council of the European Union, Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources-Analysis of the final compromise text with a view to agreement (2018)
- [6] AiF-Projekt, IGF-Förderkennzeichen 15553 N: „Untersuchungen zur Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei der Verbrennung von N-haltigen biogenen Produktgasen in Thermoprozessanlagen“ (N-BG), Abschlussbericht (2010)
- [7] <https://worldbioenergy.org/uploads/pdf/3%20in%201%20webinar/Pyrolysis%20Experience%20in%20Finnish%20CHP%20and%20Heat%20Plants%20-%20Joakim%20Autio,%20Valmet.pdf> (22.08.2019)
- [8] <https://www.btg-btl.com/en> (12.08.2019)
- [9] Lehto, Jani, Oasmaa, Anja, Solantausta, Yrjö, Kytö, Matti, Chiaramonti, David; Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils. Espoo: VTT. 79 p. (VTT Technology; 87) ISBN 978-951-38-7929-7, 978-951-38-7930-3 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T87.pdf> (2013)
- [10] Lehto, Jani, Oasmaa, Anja, Solantausta, Yrjö, Kytö, M., Chiaramonti, D.; Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass: Elsevier. Applied Energy, vol. 116, no. March, pp. 178 – 190 doi:10.1016/j.apenergy.2013.11.040 (2014)
- [11] Experience with firing pyrolysis oil on an industrial scale, Maarten Rinket, Ardy Toussaint, PyNe newsletter no. 31, pp 3-4
- [12] Renewable Residential Heating with Fast Pyrolysis Bio-oil: Residue2Heat, R.T.E. Hermanns, T. Rütten, B. van de Beld, A. Oasmaa, P. Massoli, A. Frassoldati, A. Toussaint, H. Insam, 25th European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE), Stockholm, Sweden, 12.06.2017
- [13] <https://presse.covestro.de/news.nsf/id/lyondellbasell-und-covestro-geben-startschuss-fuer-investitionsprojekt-in-maasvlakte-rotterdam> (12.08.2019)
- [14] S. Zadmajid, S. Albert-Green, Y. Afarin, M. J. Thomson; Energy Fuels 2017, 31 (6), 6065 – 6079. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b03417
- [15] Neulen, Martin; Feldhoff, Sebastian; Koch, Winfried; Anwendungstechnische Eigenschaften flüssiger Brennstoffe mit biogenen Anteilen. DGMK-Forschungsbericht 729. ISBN: 3941721534

- [16] H. Ackermann, L. Ebersbach; Ablagerungsbildung in vormischenden Brennersystemen - Untersuchung zur Ursache und Minimierung durch Modifikation der Verdampfer-Oberfläche: [Laufzeit: 01.12.2012 - 31.05.2015], DGMK-Forschungsbericht, Vol. 749, DGMK, Hamburg (2015)
- [17] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft (2002)
- [18] AiF-Projekt, IGF-Förderkennzeichen 16202 N: „Entwicklung eines Mehrstoffbrenners für Heizöl-, Erdgas- und Schwachgasbetrieb“ (MSB), Abschlussbericht (2012)
- [19] Angaben zur Klärschlamm-Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt (2018)
- [20] Studie, Ecofys Germany GmbH: „Die Rolle von Gas im zukünftigen Energiesystem“ (2018)
- [21] AiF-Projekt, Förderkennzeichen IGF 20155 BG: „Direkteinsatz von Rohbiogas in der Metallurgie zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen - Auswirkungen von variablen Rohbiogasmengen und schwankenden Methangehalten auf die Produktqualität und Prozessstabilität – MetaCOO“ (seit 2017)
- [22] J. Behling, P. Danz, T. Marzi et al.; Verbesserte Feuerraummodellierung durch empirische Untersuchungen zur Flüchtigen Freisetzung aus Abfallbrennstoffen und Biomassen, 25. Deutscher Flammentag 2011, VDI-Verlag GmbH (2011)
- [23] Abschlussbericht, EU-Projekt, Förderkennzeichen SES6-CT-2003-502812: „New Burner Technologies for Low Grade Biofuels to Supply Clean Energy for Processes in Biorefineries“ (2007)
- [24] Abschlussbericht, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Förderkennzeichen 22749-24/0: „Entwicklung eines schadstoffemissionsarmen Brennerkonzeptes für Industriekesselfeuerungen“ (2008)
- [25] Abschlussbericht, AiF-Projekt, Förderkennzeichen 14472 N: „Entwicklung flexibler Feuerungssysteme zur Verbrennung von Schwachgasen in Mikrogasturbinen-Brennkammern“ (2008)
- [26] Abschlussbericht, AiF-Projekt, Förderkennzeichen 16202 N: „Entwicklung eines Mehrstoffbrenners für Heizöl-, Erdgas- und Schwachgasbetrieb (MSB)“ (2012)
- [27] Abschlussbericht, Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM), Förderkennzeichen KF2517705CL2: „Entwicklung eines innovativen Brennersystems zur energetischen Nutzung von Produktgas aus pyrolysierten Gärresten“ (2014)
- [28] DIN EN 16900:2017-05: „Schnellpyrolyse-Bioöle für industrielle Kesselanlagen - Anforderungen und Prüfverfahren“; Deutsche Fassung, EN 16900:2017
- [29] Europäische Kommission: [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap_de)