

# Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2020

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, Teil 2

**Harald Horn, Thomas Kolb, Dimosthenis Trimis und Josef Klinger**

Forschung und Lehre, Tätigkeitsbericht, Ausbildung, Weiterbildung

Dieser jährlich erscheinende Bericht gibt einen Überblick über die Entwicklungen und Aktivitäten am Engler-Bunte-Institut, der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT sowie der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Darüber hinaus wird über das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser berichtet. Wie es auch in den vergangenen Jahren gehandhabt wurde, erscheinen die gasspezifischen Beiträge in gwf Gas + Energie (Teil 1: Ausgabe 6/2021, EBI ceb; Teil 2: Ausgabe 7-8/2021, EBI vbt) und die wasserspezifischen Beiträge in gwf-Wasser | Abwasser (Teil 3: Ausgabe 6/2021, EBI WCT; Teil 4: Ausgabe 7-8/2021, TZW). Typischerweise steht die Entwicklung der verschiedenen Einrichtungen mit Beiträgen aus der universitären Lehre, der Aus- und Weiterbildung, über Forschungs- und Entwicklungsprojekte, über Beratung und Firmenkontakte im Fokus. In diesem Bericht wird aber unstrittig auch immer wieder die Corona-Pandemie thematisiert werden, da sie sehr tief in die Organisation der Forschungsarbeiten und vor allem der Lehre eingegriffen hat.

The annual report aims at giving an overview of developments and activities of the Engler-Bunte-Institut, the DVGW-Research Center, the Research Center of Fire Protection Technology, and the TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser (German Water Center). As every year, the gas related parts can be found in gwf Gas + Energie (part 1: issue 6/2021, EBI ceb; part 2: issue 7-8/2021, EBI vbt) and the water related parts in gwf-Wasser | Abwasser (part 3: issue 6/2021, EBI WCT; part 4: issue 7-8/2021, TZW). The report typically highlights academic teaching, courses and advanced education, and focuses on scientific research and development projects, on consulting and contacts to business companies as well as on other activities. However, the current annual report also addresses the effects of the corona pandemic, which does significantly influence the daily work in research, consulting and of course teaching.

**(Fortsetzung aus gwf Gas + Energie, Ausgabe 6/2021)**

## 2. Aktivitäten des Teilinstituts Verbrennungstechnik, der DVGW-Forschungsstelle, Prüflaboratorium Gas, und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Dimosthenis Trimis, Nikolaos Zarzalis, Henning Bockhorn, Jens Hoffmann, Dietmar Schelb

### 2.1 Lehre und Forschung

Am Teilinstitut für Verbrennungstechnik wurden 2020 Forschungsgebiete insbesondere mit dem Schwerpunkt flexible Energiebereitstellung bearbeitet. Dabei wurden sowohl bereits etablierte Forschungsbereiche weiterentwickelt als auch neue Thematiken erschlossen. Im Rahmen der Forschungsgebiete Energiespeicherung und -umwandlung, der Rußbildung, der Verbrennungsinstabilitäten, der Verbrennungstechnik in stationären und Flugzeuggasturbinen sowie der grundlegenden Beschreibung von Verbrennungsvorgängen durch numerische Simulation wurden eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, an denen auch der ehemalige Leiter Prof. Bockhorn weiterhin in angemessenem Umfang beteiligt ist.

Die generelle Ausrichtung der Forschung am Teilinstitut ist vor dem alle Themengebiete umspannenden, gemeinsamen Hintergrund zu sehen:

- In der 2017 von der internationalen Organisation „The Millennium Project“ veröffentlichten Auflistung der 15 globalen Herausforderungen wird die Sicherstellung der Energieversorgung in den kommenden Jahrzehnten und die damit verbundene, zwingend erforderliche, nachhaltige Entwicklung der Menschheit zur Beschränkung des Klimawandels aufgelistet.
- Darin ist das Themenfeld „Sicherung der Energieversorgung“ enthalten und es wird daher auch weiterhin in vielen Feldern der Forschung und Entwicklung präsent sein. Themen rund um erneuerbare Energien, alternative Kraftstoffe, Speicherung und effiziente Nutzung von Energie spielen ebenso eine entscheidende Rolle wie deren Bereitstellung und Verteilung. Diese ist aufgrund ihrer schwankenden Verfügbarkeit durch schnelle und präzise Steuerung und intelligente Vernetzung zu ermöglichen.
- Der Nachhaltigkeitsaspekt wird durch die Nutzung von alternativen und erneuerbaren Energiequellen in Zukunft verstärkt auch in die Prozesse der Fertigungsindustrie Einzug halten, so dass die spezifischen Auswirkungen deren schwankender Verfügbarkeit bei ihrer Anwendung große Auswirkungen auf die Sicherstellung der Produktqualität haben werden. Im Zusammenhang mit diesen Grundüberlegungen steigen die Anforderungen, die für eine Erhaltung bzw. Steigerung der Qualität von Produkten an die Energieeffizienz im Herstellungsprozess und damit auch an die exakte Steuerbarkeit aller beteiligten Teilprozesse gestellt werden müssen.
- Um eine kontinuierliche Energieversorgung zu gewährleisten, wird also der Fokus auf der gesamten

Systemtechnik liegen. Aus diesem Grund können die auf der eingesetzten Systemtechnik basierenden Aufgaben nur in Zusammenarbeit und auf der Grundlage interdisziplinärer Expertise entwickelt werden. Als Konsequenz daraus gewinnt die interdisziplinäre Verbundforschung, insbesondere mit den Materialwissenschaften immer mehr an Bedeutung.

- Sowohl experimentelle als auch immer stärker numerische Methoden sind im Hinblick auf die zu erwartenden Probleme wichtig. Die Erhöhung der Rechenleistung ermöglicht dabei eine zunehmend genauere Modellierung und numerische Simulation auch von komplexen und multiskaligen Prozessen.

Aufgrund dieser Überlegungen verfolgt das Teilinstitut für Verbrennungstechnik folgende Forschungsschwerpunkte:

- Die Untersuchungen zu Zündvorgängen, Strömungs- und Verbrennungsinstabilitäten, der Spraybildung und Verbrennung neuartiger flüssiger Brennstoffe, die Wechselwirkungen zwischen Verbrennungsprozessen und Werkstoffen. Dazu sind auch grundlegende Untersuchungen zur Flammenstruktur an Modellflammen unerlässlich.
- Die Kombination von Verbrennungsprozessen mit anderen Verfahren wie thermoelektrischen, elektrochemischen (Elektrolyse, Brennstoffzellen), solarthermischen und solarchemischen Verfahren ist ein Forschungsthema, das nicht nur den energetischen, sondern verstärkt auch den stofflichen Aspekt des Verbrennungsprozesses in den Vordergrund rückt.

Im Bereich der Lehre wurden überwiegend Veranstaltungen in den klassischen Bereichen der Verbrennungstechnik, aber auch weitergehende Lehrveranstaltungen in Grund- und Vertiefungsfächern der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik (CIW/VT) angeboten. Das Praktikum „Numerik im Ingenieurwesen“ sowie die Vorlesungen „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien“, „Messtechnik in der Thermofluidynamik“ und „Energietechnik“ können hier erwähnt werden. Das Angebot an Lehrveranstaltungen konnte trotz der herausfordernden Umstände in Zusammenhang mit der COVID-19 Pandemie durch Online-Vorlesungen oder als Online-Praktikum (z. B. Numerik im Ingenieurwesen) sehr erfolgreich durchgeführt werden. Neben diesen besonders hervorgehobenen Veranstaltungen sind viele Studierende während ihres Studiums auch an den Forschungsaktivitäten des Teilinstituts beteiligt. Trotz der

Herausforderungen durch die Pandemie im Jahr 2020 wurden acht Bachelor- und acht Masterarbeiten abgeschlossen.

### 2.2 Laufende Forschungsarbeiten im Bereich Verbrennungstechnik

Die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Verbrennungstechnik konzentriert sich auf Problemstellungen, die sich für die Speicherung und Bereitstellung von Energie aus fossilen und nachwachsenden Rohstoffen ergeben, auf eine Reduktion der Entstehung von Schadstoffen bei der Verbrennung fossiler und insbesondere auch nicht-fossiler, nachwachsender Brennstoffe, auf die Entwicklung von neuen Verbrennungskonzepten für den schadstoffarmen Betrieb von Flugzeuggasturbinen und stationären Gasturbinen sowie auf die Erarbeitung von Alternativen zum Einsatz von fossilen Brennstoffen, zu der energetischen Verwertung von Biomassen, der Verringerung von Lärmemissionen aus Verbrennungsprozessen und der Entwicklung von Modellierungsansätzen für die Vorausberechnung von Verbrennungsvorgängen und Verbrennungseinrichtungen, die zu deren Optimierung genutzt werden können. Die in diesen vielfältigen Themenbereichen durchgeführten Forschungsvorhaben werden sowohl in internationalen als auch nationalen Verbundvorhaben und direkten Industriekooperationen durchgeführt.

Innerhalb eines vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Kooperationsprojektes, das im Jahr 2021 abgeschlossen werden wird, wurde im Teilprojekt „Modellierung des Verbrennungsverlaufs bei der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen und Flüssigbrennstoff/Wasser-Emulsionen“ die Zielstellung „Betriebsflexibilität und Brennstoffflexibilität“ in Kooperation mit der Siemens AG verfolgt und so die Entwicklung von Verbrennungstechnologien für die klimaschonende Energieumwandlung vorangetrieben.

In diesem Vorhaben wurden die für die Beschreibung der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen erforderlichen Teilmodelle zu einem Gesamtmodell zusammengefügt und an einem industrienahen System erprobt. Eine ähnliche Zielstellung verfolgt auch das von der Europäischen Union im Rahmen des „Horizon 2020“ Programms geförderte Verbundprojekt „Turbomachinery retrofits enabling flexible back-up capacity for the transition of the European energy system“ (TurboReflex), das ebenfalls in 2021 abgeschlossen werden wird. Für eine Überbrückungszeit zwischen angeforderter Leistung und deren Bereitstellung durch erneuerbare Energiequellen ist die zurzeit bereits installierte Leistung fossil befeuerter Kraftwerke zwar groß genug, jedoch sind die vorhandenen Anlagen in erster Linie nur für die Abdeckung der Grundlast ausgelegt. Eine von dieser Leistungsabnahmeform abweichende Betriebsweise führt zu stark erhöhtem Verschleiß sowie unnötig hohen Emissionen. Im Verbundprojekt TurboReflex wurden daher Technologien zur Ausrüstung bereits installierter Kraftwerke erforscht, die eine flexiblere Betriebsweise ermöglichen. Damit soll erreicht werden, dass eine Betriebsweise mit hohen Lastgradienten nicht zu einer Verschlechterung in Bezug auf Betriebszeit, Kosten und Emissionen führt. Eine entscheidende Hürde für die Ausweitung der möglichen Teillastbedingungen und Leistungsgradienten stellt die emissionskonforme magere Verlöschgrenze („lean blow off“, LBO) dar. Strahlstabilisierte, vorgemischte Flammen bieten in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit, Verbrennungstemperaturen bis zu nur 1000-1200 °C zu erreichen und so eine Erweiterung des möglichen Teillastbetriebs bei gleichen Emissionen zu erreichen. Am Teilinstitut für Verbrennungstechnik wurde in diesem Rahmen die numerische Vorhersagbarkeit der Verlöschgrenzen mit fortschrittlichen Verbrennungsmodellen untersucht und verbessert. Im Jahr 2020 konnte in dem im Projekt bearbeiteten Arbeitspaket ein Kriterium für die Berechnung der mageren Abblasegrenzen für ein Modellsystem (Bild 2.1) definiert werden, das in der Lage ist, Messergebnisse mit guter Genauigkeit wiederzugeben.

Im Rahmen des europäischen Verbundprojektes „Energy Efficient Coil Coating Process“ (ECCO), das vom Teilinstitut Verbrennungstechnik koordiniert wird, wird ein neues Ofenkonzept zur Trocknung von lösemittelhaltigen Beschichtungen auf Stahlbändern entwickelt. Strahlungsbrenner dienen dabei zur Bereitstellung von Wärme in Form von Festkörperwärmestrahlung im infraroten Bereich. Das neue Ofenkonzept erlaubt, dass die Strahlungsbrenner mit dem verdampften Lösemittel als Brennstoff betrieben werden. Mit dem Fokus der Effizienzsteigerung des Gesamtprozesses wird im Rahmen des Projektes am Teilinstitut Verbrennungstechnik an der

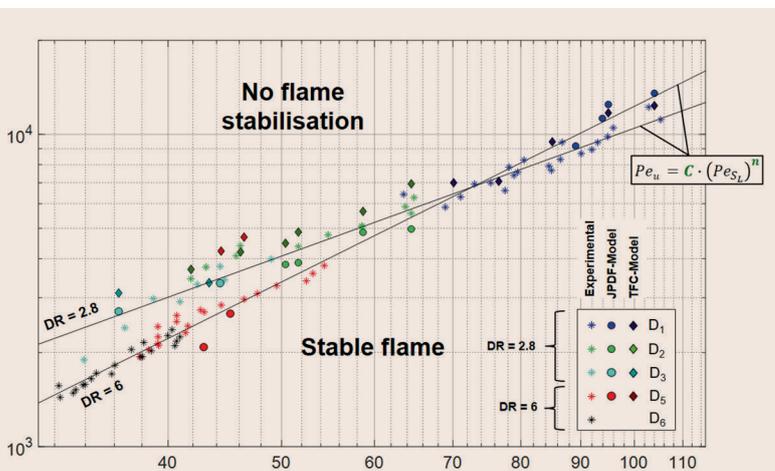


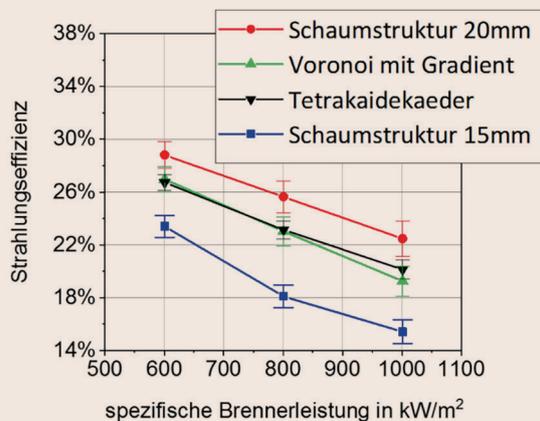
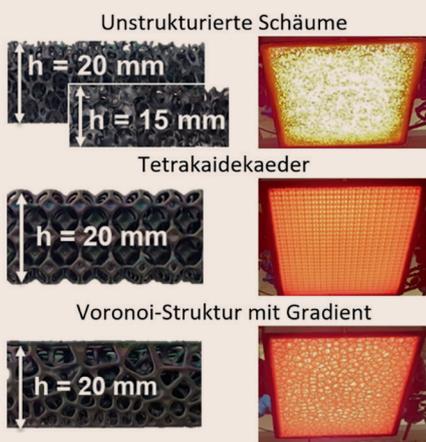
Bild 2.1: Vergleich von berechneten und gemessenen mageren Verlöschgrenzen (LBO) für verschiedene Düsengeometrien (D1-D6)

Optimierung der Brenner geforscht. Strahlungsbrenner werden als Vormischbrenner betrieben und bestehen aus einem Mischmodul, einer Flammensperre und einer porösen, keramischen Struktur. Die laufenden Untersuchungen beziehen sich insbesondere auf die Gestaltung dieser keramischen Struktur. Zur Bewertung verschiedener Strukturen wird unter anderem die Strahlungseffizienz herangezogen, welche das Verhältnis aus Strahlungsleistung und Brennerleistung darstellt. Zur Bestimmung der Strahlungseffizienz des untersuchten Strahlungsbrenners wurde eine genormte Messmethode zur Ermittlung der Strahlungsleistung von Dunkel- und Hellstrahlern (DIN EN 419) adaptiert. Betrachtet wurden die in **Bild 2.2** links dargestellten keramischen Strukturen. Die unstrukturierten Schäume unterscheiden sich in der Höhe (Brenner-einlass bis -auslass) sowie der Herstellungscharge, was zu unterschiedlichen Porendurchmessern führt. Die Tetraikaedekader-Struktur bildet einen periodisch monodispersen Schaum ab und die Voronoi-Struktur ermöglicht die Abbildung einer zufälligen Schaumstruktur und bietet zusätzlich die Möglichkeit die Porengröße in Strömungsrichtung (klein zu groß) zu variieren.

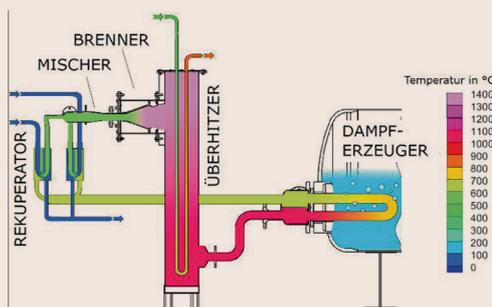
Die Strahlungseffizienz der beschriebenen Strukturen wurde bei unterschiedlichen spezifischen Brennerleistungen

gen bestimmt und weist eine signifikante Bandbreite auf, wie in **Bild 2.2** zu erkennen ist. Zusammen mit geometrischen Analysen der Strukturen sowie detaillierten numerischen Untersuchungen konnten entscheidende Einflussfaktoren auf die Strahlungsauskopplung der Strahlungsbrenner identifiziert werden. In einem abschließenden Entwicklungsschritt werden strahlungsoptimierte Strukturen entwickelt und experimentell untersucht.

Im ebenfalls europäisch geförderten Verbundprojekt „Advanced direct biogas fuel processor for robust and cost-effective decentralised hydrogen production“ (BioRoburPlus) wird Wasserstoff aus entschwefeltem Rohbiogas mittels oxidativer Dampfreformierung produziert. Ziel des Projektes ist die Demonstration des Prozesses mit hohem Wirkungsgrad im technisch relevanten Maßstab von ca. 100 kg Wasserstoff pro Tag. Der hohe Wirkungsgrad wird durch energetische Verwertung eines im Prozess anfallenden Schwachgases erreicht. Der Beitrag des Teilinstituts Verbrennungstechnik zum Projekt ist ein System zur Verbrennung und Prozesswärmebereitstellung, bestehend aus Mischer, Brenner, Überhitzer, Dampferzeuger und Rekuperator (**Bild 2.3**). Der entwickelte Porenbrenner deckt dabei ein weites Leistungsspektrum von 4-34 kW ab und kann mit unterschiedlichen Brenngasen



**Bild 2.2:** Fotografien der untersuchten keramischen Strukturen (Strömungsrichtung von unten) und der Strahlungsbrenner in Betrieb (links), Strahlungseffizienz eines Strahlungsbrenners mit den untersuchten keramischen Strukturen über der spezifischen Brennerleistung (rechts)



**Bild 2.3:** Links: Maßstabgetreue Skizze der Brennersektion mit Mischer, Brenner, Überhitzer, Dampferzeuger und Rekuperator. Die Farbe der Ströme repräsentiert die jeweilige Temperatur. Rechts: Brennersektion und Dampferzeuger im Aufbau der Gesamtanlage

betrieben werden: zum einen mit dem im Prozess anfallenden Schwachgas (21 Vol.-% Wasserstoff; Heizwert 2 MJ/kg), zum anderen mit entschwefeltem Rohbiogas (60 Vol.-% Methan; Heizwert 18 MJ/kg), welches dem Prozess als Einsatzstoff dient. Herausforderung dieser Entwicklung war die Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Strukturen bei stark variierenden Heizwerten und hohen Luftvorwärmtemperaturen durch Rekuperation. Die automatisierte Regelung des Brenners kann dabei auch für Gemische beider Gase und bei

Schwankungen in der Gaszusammensetzung einen stabilen Brennerbetrieb gewährleisten. Das Brennersystem mit Überhitzer und Rekuperator wurde am Teilinstitut Verbrennungstechnik entwickelt, gebaut und ersten Tests unterzogen. Die Inbetriebnahme der Gesamtanlage findet im Frühjahr 2021 nahe Turin (IT) bei ACEA Pinerolese Industriale S.p.A. statt. In der verbleibenden Projektlaufzeit bis zur Jahresmitte wird in Demonstrationskampagnen Wasserstoff mit einer Reinheit von 99,9 % bei einer Energieeffizienz von 80 % produziert.

Im durch die EU geförderten Projekt „Renewable Power Generation by Solar Particle Receiver Driven Sulphur Storage Cycle“ (PEGASUS) soll ein geschlossener Speicherkreislauf basierend auf Schwefel eine grundlastfähige Stromproduktion mittels konzentrierter Solarthermie ermöglichen. Dazu wird ein Solarabsorber mit einem thermochemischen Speichersystem für Sonnenenergie auf Grundlage von elementarem Schwefel und Schwefelsäure kombiniert (siehe Bild 2.4). Durch die Verbrennung von Schwefel lassen sich diese Kraftwerke grundlastfähig machen.

Das vom Teilinstitut Verbrennungstechnik durchgeführte Teilprojekt entwickelt die Brenner-technologie für die Verbrennung von Schwefel bei hohen Leistungsdichten, die für den Einsatz in Gasturbinen notwendig sind und damit eine effektive Stromproduktion mittels kombinierter Gas- und Dampfkraftwerke ermöglichen. Im Labormaßstab entsteht dazu ein Schwefelbrenner mit einem Lastbereich von 10-50 kW. Das entwickelte Brennersystem mit einem doppel-konzentrischen Drallbrenner ist in Bild 2.5 zu sehen, das in Anlehnung an das Brennersystem von Flugtriebwerken konstruiert ist.

Für die Verbrennung von Schwefel bei hohen Leistungsdichten ist der Zerstäubungsprozess entscheidend. Es wurden bei isothermen Bedingungen (413 K) umfangreiche Zerstäubungsexperimente am Teilinstitut Verbrennungstechnik durchgeführt (siehe Bild 2.6). Die Tropfengrößenverteilung wurde mittels Phasen-Doppler-Anemometrie für verschiedene Betriebsbedingungen bestimmt und als Eingangsgröße zu CFD Berechnungen und zur Validierung von Modellen verwendet. Die Erreichbarkeit der hohen Leistungsdichten mit dem entwi-

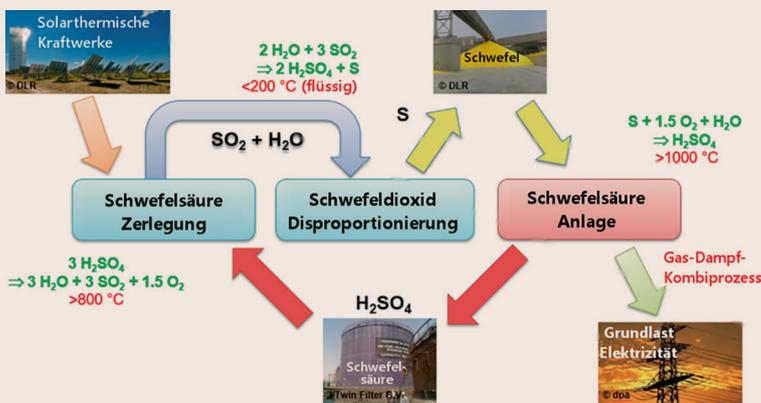


Bild 2.4: Schema des schwefelbasierten thermochemischen Kreislaufs zur Speicherung und Nutzung von Sonnenenergie

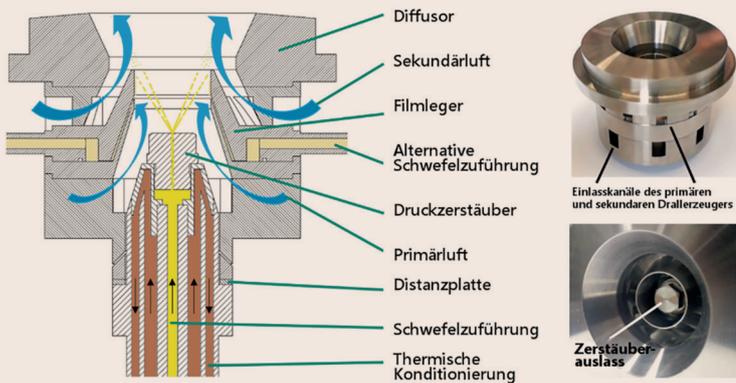
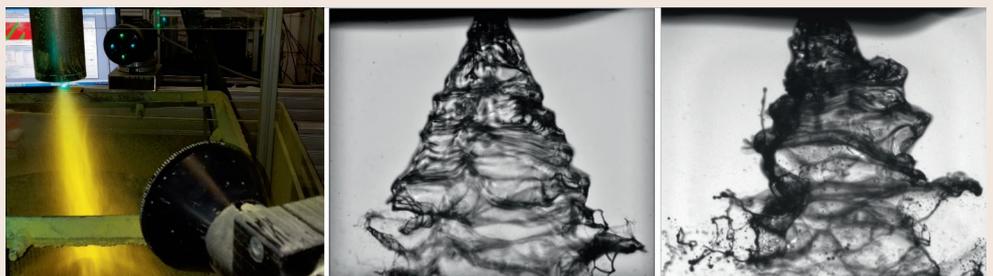
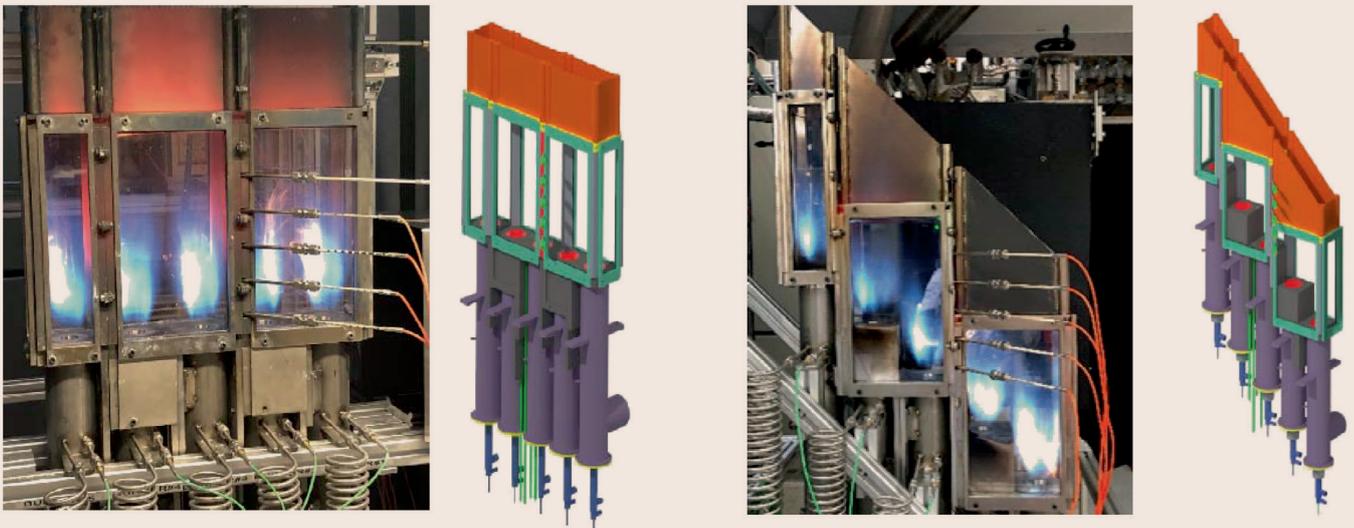


Bild 2.5: Querschnittsansicht des entwickelten Brenners zum Verbrennen von Schwefel

Bild 2.6: Zerstäubungsexperimente mit flüssigem Schwefel zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilung mittels Phasen-Doppler-Anemometrie und Visualisierung des Primärzerfalls mittels Shadowgraphy





**Bild 2.7:** Modularer Multibrennerprüfstand zur Untersuchung verschiedener Neigungswinkel von abgehoben brennenden, mageren Flammen

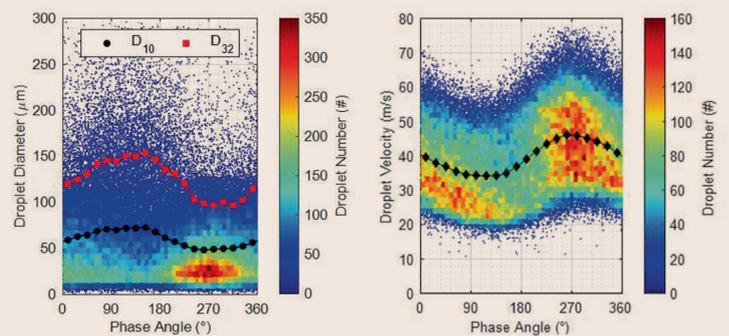
ckelten Brennerkonzept wurde durch hochauflösende numerische Simulationen bestätigt. Im nächsten Schritt wird der Schwefelbrenner am Teilinstitut Verbrennungstechnik getestet.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts CHAIRLIFT (*Compact Helical Arranged combustors with lean LIFTed flames*) wird ein innovatives Brennkammerkonzept für Flugzeugantriebe entwickelt, welches das Potenzial aufweist, die zukünftigen Emissionsziele gemäß der „Flightpath 2050“ Zielstellung hinsichtlich extrem geringer Stickoxidemissionen zu erreichen.

Dafür werden abgehoben brennende, magere Flammen mit einer sogenannten helikalen Anordnung von Brennern in der Ringbrennkammer von Flugzeugtriebwerken kombiniert. Bei dieser Anordnung werden Brenner in Umfangsrichtung bezogen auf die Turbinenachse in einer Ringbrennkammer geneigt. Dies führt dazu, dass sich die abgehobenen brennenden Flammen gegenseitig stabilisieren. Weitere Vorteile sind eine kürzere Brennkammer sowie ein geringerer notwendiger Neigungswinkel der Leitschaufeln und damit ein geringerer Kühlluftbedarf.

Am Teilinstitut Verbrennungstechnik werden die experimentellen Untersuchungen an einem modularen Multibrennerprüfstand mit verschiedenen Neigungswinkeln der Brenner durchgeführt (**Bild 2.7**). Als Brennstoff wird Kerosin (JET-A1) eingesetzt. Die ersten Ergebnisse hinsichtlich der Flammenstabilität sind vielversprechend und im nächsten Schritt erfolgt die Messung der Luftgeschwindigkeitsfelder und Abgasemissionen.

Im Rahmen des Projekts EU-MAGISTER (*Machine learning for Advanced Gas turbine Injection Systems to Enhance combustor performance*) wird das Auftreten von thermo-



**Bild 2.8:** Tropfendurchmesser und -anzahl (links) sowie Tropfengeschwindigkeit und -anzahl (rechts) während einer Periode bei einer Anregungsfrequenz von 120 Hz

akustischen Phänomenen in Flugzeugturbinen untersucht. Der Beitrag des Teilinstituts für Verbrennungstechnik ist die Untersuchung der Auswirkung einer pulsierenden Luftströmung auf den Zerstäubungsprozess des Brennstoffes. Hierzu werden grundlagen- und anwendungsorientierte Düsen eingesetzt. Die Luftströmung wird mittels einer Sirene angeregt, um so sowohl Anregungsfrequenz als auch Amplitude zu kontrollieren. Das Spray wird mit der optischen Messmethode „Phasen-Doppler-Anemometrie“ phasenabhängig von der Anregung charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Anregungsfrequenzen unter 400 Hz zu einer starken Schwankung des Sauterdurchmessers führen. Verantwortlich dafür ist die Separierung der Tropfendurchmesser aufgrund der unterschiedlich starken Wirkung der Trägheitskräfte (siehe **Bild 2.8**). Dies führt letztendlich zu einer starken Schwankung

der lokalen Luftzahl in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz, was das thermoakustische Phänomen in der Flugzeugturbine wiederum verstärken kann.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 150 „Turbulente, chemisch reagierende Mehrphasenströmung in Wandnähe“, welcher gemeinsam von der TU Darmstadt und dem KIT durchgeführt wird, wird am Teilinstitut Verbrennungstechnik die Wechselwirkung zwischen Skalartransport und Turbulenz an Wänden experimentell untersucht. Der Versuchsträger besteht dabei aus einer Düse, die mittig mit einer Trennwand versehen ist. Die beiden Teilströme propagieren nach Düsenaustritt in einer gewissen Distanz gegen eine zur Strömungsrichtung senkrechte oder geneigte Wand. Die übergeordnete wissenschaftliche Fragestellung der Untersuchungen in der generischen motor- und abgassystemrelevanten Strömungskonfiguration besteht darin, in Wandnähe die Interaktion von Impuls-, Wärme- und Stofftransport bei der Anströmung der gasförmigen Scherschicht zwischen beiden Fluiden zu erforschen. Hierzu werden zum einen zur Bestimmung der Skalar- und Geschwindigkeitsfelder laserdiagnostische Messtechniken, wie die Planare Laserinduzierte Fluoreszenz (PLIF), die Particle Imaging Velocimetry (PIV)/Particle Tracking Velocimetry (PTV) und die (2-Punkt-)Laser-Doppler-Anemometrie (LDA), eingesetzt.

Aus Platzgründen kann hier keine vollständige und detaillierte Übersicht über alle Forschungsarbeiten gegeben werden. Hierzu sei auf direkte Kontakte hingewiesen, die sich einfach über die Internetadresse <http://vbt.ebi.kit.edu> herstellen lassen.

### 2.3 Abgeschlossene Promotionen

Im Jahr 2020 wurde am Teilinstitut Verbrennungstechnik eine Dissertation abgeschlossen. Einen Überblick über das Forschungsthema gibt die im Folgenden aufgeführte kurze Zusammenfassung der Arbeit:

**Aleksandar Aleksandrov:** Untersuchung der Rußbildung und -oxidation in turbulenten nicht vorgemischten Drallflammen – Einfluss von Verbrennungsinstabilitäten. (Prof. Dr. H. Bockhorn, Prof. Dr. R. Suntz)

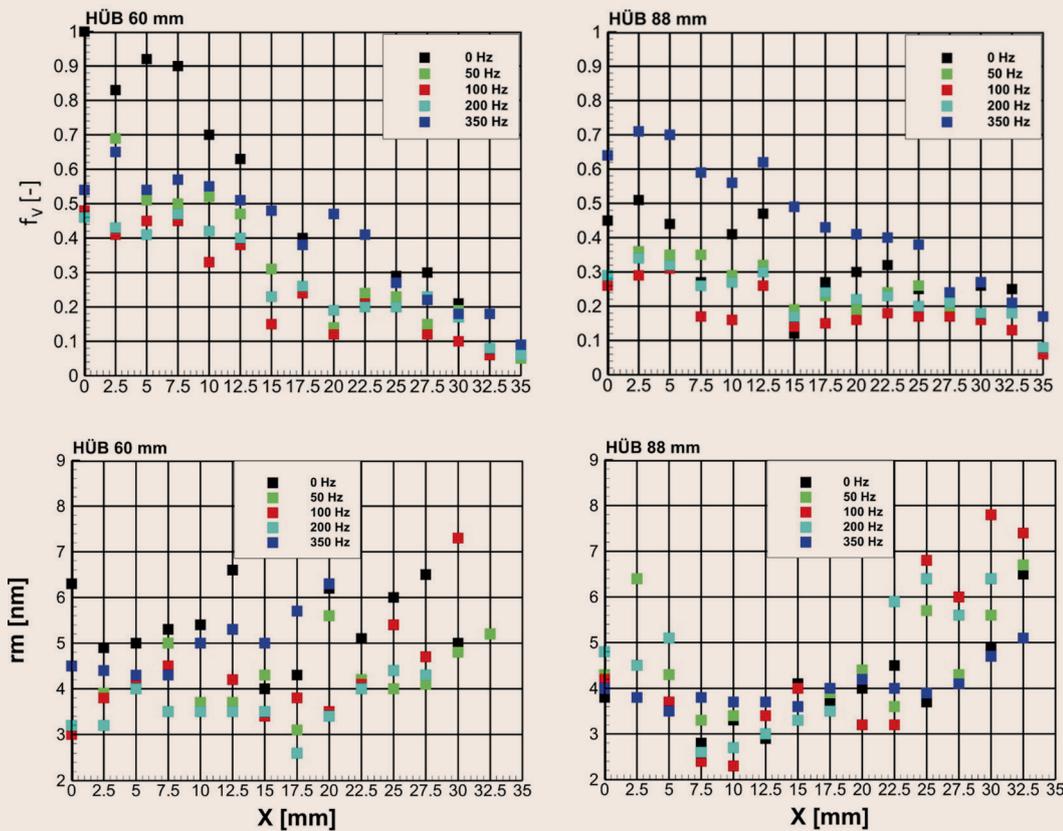
Die Hauptziele dieser Arbeit waren die experimentelle Untersuchung der Reaktion nicht vorgemischter turbulenter Drallflammen auf akustische Störungen bei einer Reihe von Anregungsfrequenzen (0-350 Hz) sowie des Einflusses von Geschwindigkeitsfluktuationen auf die Bildung und Oxidation von Ruß und Rußvorläufermolekülen. Im Fokus dieser Untersuchungen lag dabei die Interaktion zwischen thermoakustischen Verbrennungsinstabilitäten und der Rußentstehung in der Flamme.

Dazu wurden Rußeigenschaften in Verbindung mit Temperatur- und OH\*-Chemolumineszenz in einer turbu-

lenten nicht-vorgemischten Erdgas/Ethen Drallflamme gemessen. Als Ergebnis konnten die Eigenschaften des gebildeten Rußes auch unter Variation des Luftverhältnisses, der Drallzahl und den in Betrieb beobachteten thermoakustischen Schwingungen (selbsterregte Verbrennungsinstabilität) bestimmt werden. Für die weitere Analyse der Rußbildung und -oxidation war es zunächst erforderlich, auch die Auswirkung der thermoakustischen Schwingungen auf die Temperaturverteilung im Brennraum zu klären. Dazu wurde insbesondere auch der Einfluss akustischer Schwingungen auf die Strömung näher untersucht. Die Verteilung der Temperatur und von Rußvorläuferkonzentrationen (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK), sowie der mit OH\*-Chemolumineszenz bestimmte Flammenposition und Wärmefreisetzung unter akustischer Anregung in der Flamme wurde im Anschluss detailliert untersucht. Für die Bestimmung der Rußeigenschaften in einem turbulenten Strömungsfeld, das bei den praxisrelevanten Bedingungen des fett/mager gestuften RQL-Modellbrenners (RQL, „rich burn, quick quench, lean burn“) anzufinden ist, war es erforderlich, die diagnostische Methode der Zwei-Farben-zeitaufgelösten laserinduzierten Inkandeszenz (LII) für diese Bedingungen zu erweitern. Nur durch die Anwendung dieser non-intrusiven laseroptischen Methode war es möglich, detaillierte Informationen in der untersuchten, komplexen Strömung zu erhalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der akustischen Anregung der Luftzufuhr die Konzentrationsgradienten reduziert werden, was im Endeffekt eine verbesserte Vermischung von Brennstoff und Luft bewirkt. Daher herrschen in der Brennkammer bei Anregung quasi „vorgemischte“ Verbrennungsbedingungen vor, und demzufolge wird die Größe lokal brennstoffreicher Zonen stark eingeschränkt. Gleichzeitig können im Fall der Anregung der Strömung (100 Hz) auch nur kleinere Temperaturgradienten beobachtet werden. Gerade solche Bedingungen hemmen aber die Bildung von PAK, was unmittelbar zu einer Inhibierung der Prozesse der Rußbildung und des Rußwachstums führt (**Bild 2.9**).

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen weiterhin eindeutig einen direkten Zusammenhang zwischen der PAK-Konzentration und den Rußeigenschaften in der Flamme. Im Fall der 100-Hz-Anregung der Strömung wird eine Abnahme des Rußvolumenbruchs  $f_v$  um ca. 50 % in allen Bereichen der Brennkammer, unter gleichzeitiger Reduktion des mittleren Rußpartikelradius, festgestellt. Dieses Ergebnis korreliert sehr gut mit der Veränderung der PAK-Konzentration in diesen Zonen: Eine Anregung mit 100 Hz verursacht eine Reduktion der Konzentration aller detektierten PAK (Naphthalin, Acenaphthalin, Indan, Inden, Pyren, Benzo[ghi]fluoranthren, Cyclopenta[cd]pyren) in der Flamme. Unter Berücksichtigung der Existenz von



**Bild 2.9:** Mittels Zwei-Farben-zeit aufgelöster LII ermittelter mittlerer normierter Rußvolumenbruch ( $f_v$ , oben) und mittlerer Rußpartikelradius ( $r_m$ , unten) unter Anregung der Strömung in einer turbulenten nicht-vorge-mischten Drallflamme bei zwei Düsenabständen HÜB

Rezirkulationszonen bedeutet die dabei beobachtete räumliche Verschiebung der Maximalwerte auch eine zeitliche Verschiebung durch ein verzögertes Auftreten der maximalen Spezies-Konzentration. Die akustische Anregung der Strömung und die dadurch verursachten Veränderungen in den Bedingungen der Brennkammer führen eindeutig zu einer Hemmung der Bildungsprozesse von PAK. Die Konzentration von Naphthalin wird um 40 %, von Acenaphthalin um 50 %, von Pyren um 60 % und von Cyclopenta[cd]pyren um ca. 30 % reduziert.

Die Umverteilung der Konzentration der PAK und die Verschiebung der Maximalwerte in Richtung der Düse haben eine direkte Auswirkung auf die Prozesse der Rußpartikelbildung, sowie auf die anschließenden heterogenen Prozesse des Oberflächenwachstums. Die Rußbildungszone (und damit die Bildung von jungem Ruß) wird unter Anregung der Strömung kleiner und kann mit zeitlichem Verzug beobachtet werden (Verzögerung der Rußpartikelbildung). Die Zone, in der Koagulationsprozesse dominieren, wird in Folge auch verschoben und tritt später auf.

Die Inhibierung der Bildung von Rußvorläufermolekülen und Rußwachstumsspezies, kombiniert mit der Vergrößerung der Zone, in der heterogenen Oxidations-

prozesse an der Rußpartikeloberfläche dominieren, resultieren in einer Reduktion der Gesamtruß-Konzentration, der Partikelgröße und der Anzahldichte in der Flamme. Die Vergrößerung der Zone hoher  $OH^*$ -Chemolumineszenz weist zudem auf eine Intensivierung der Rußoxidationsprozesse mittels  $OH$ -Radikalen hin. Dazu beschleunigt die Vergrößerung der inneren Rezirkulationszone (IRZ) die sekundäre Oxidation der bereits entstandenen Rußpartikel, indem die Verweilzeit dieser Partikel in einer Region hoher  $OH$ -Radikal-Konzentration erhöht wird. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass der Einfluss einer Anregung der Strömung auf die Rußbildung und Oxidation auf zwei Hauptmechanismen beruht. Einerseits kann eine frequenzabhängige Intensivierung der Oxidationsprozesse durch eine Ausdehnung der Zone hoher Konzentration von  $OH$ -Radikalen festgestellt werden, andererseits ist eine ebenfalls frequenzabhängige Inhibierung der PAK-Bildung zu beobachten. Die Berücksichtigung aller diagnostischen Ergebnisse dieser Arbeit erlaubt es, folgende Hypothese aufzustellen: *Der beobachtete frequenz- und amplitudenabhängige Einfluss der erzwungenen akustischen Anregung der Strömung auf die Prozesse der Rußbildung und -oxidation ist eine Folge der signifikanten Änderung des Geschwindigkeits-*

und Temperaturfeldes sowie der OH-Radikal-Konzentration in der Flamme.

Aufgrund der akustischen Anregung der Luftzufuhr werden die Konzentrationsgradienten reduziert, was in Folge eine verbesserte Vermischung von Brennstoff und Luft bedeutet. Somit herrschen in der Brennkammer in höherem Maße „vorgemischte“ Verbrennungsbedingungen vor, demzufolge die lokalen brennstoffreichen Zonen stark eingeschränkt werden. Gerade solche Bedingungen hemmen die Bildung von PAK (Naphthalin, Acenaphthalin, Pyren etc.), was unmittelbar zu einer Abnahme der Rußpartikelbildung und des Rußwachstums führt. Die Vergrößerung der Zone hoher OH\*-Chemolumineszenz weist auf eine Intensivierung der Rußoxidationsprozesse mittels OH-Radikalen hin. Dabei wird die sekundäre Oxidation der bereits entstandenen Rußpartikel von der Vergrößerung der IRZ begünstigt.

Das Auftreten von Verbrennungsinstabilitäten kann, je nach Frequenz, gravierende Folgen auf die Prozesse der Rußbildung und Oxidation und somit auf die Rußemission von technischen Verbrennungsanlagen haben. Der frequenz- und amplitudenabhängige Einfluss solcher Instabilitäten muss unbedingt bei der Rußmodellierung berücksichtigt werden, um eine Erhöhung der Genauigkeit von den Vorhersagemodellen zu erreichen.

Das Erzeugen verbesserter Homogenität und damit von quasi „vorgemischten“ Bedingungen in der Flamme mit einer gezielten Anregung der Luftströmung ist eine interessante Beobachtung und könnte als Ausgangspunkt einer neuartigen Strategie zur weiterführenden Optimierungen von Verbrennungsanlagen in Hinsicht auf deren Umweltverträglichkeit (Reduktion der Rußemission) angesehen werden. Dabei ist die zur Anregung der Strömung benötigte Energie um Größenordnungen kleiner als die Leistung der Flamme.

## 2.4 Forschungsstelle für Brandschutztechnik

### IMK-Themen

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik ist u. a. von den Bundesländern im Rahmen der Innenministerkonferenz (IMK) beauftragt, anwendernahe Forschung für die Feuerwehren durchzuführen. Im Jahre 2020 wurden dazu fünf Forschungsberichte fertiggestellt und veröffentlicht.

- Nr. 159: Schelb, D.; Jordan, T. „Besonderheiten und Risiken bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen“
- Nr. 204: Augustin, D.; Schöps, F. „Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungsbrand - Teil 2“
- Nr. 205: Max, D. „Anwendungsbereiche und -grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes Teil IV: Ansätze und Bemessungsbrände“

- Nr. 206: Böhler, K.; Dinkov, I. „Ertüchtigung eines kommerziellen Strömungssimulationsprogrammes zum praktikablen Gebrauch bei realen Brandszenarien“
- Nr. 207: Vetter, M.; Schöps, F.; Schelb, D. „Einsatz von Wärmebildkameras zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen von Wohnungstüren bei Bränden“

### Lehre und Weiterbildung an der Landesfeuerwehrschule Bruchsal und an der angegliederten Akademie für Gefahrenabwehr

2020 wurde an der Landesfeuerwehrschule BaWü Unterricht für die Lehrgangsteilnehmer des höheren und gehobenen Dienstes gehalten - pandemiebedingt allerdings in geringerem Umfang als die Jahre zuvor.

### Laufende Forschungsarbeiten

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) arbeitet an verschiedenen Forschungsthemen rund um die Gebiete des vorbeugenden, abwehrenden und anlagentechnischen Brandschutzes.

Im Rahmen der IMK-Forschung wurden Brandversuche durchgeführt, um empirische und numerische Modelle zu überprüfen. Insbesondere sollten in den beschriebenen Versuchen empirische Beziehungen bezüglich der Flammenlänge von turbulenten Diffusionsflammen sowie die in der Mittelachse über dem Brand auftretenden Temperaturen überprüft werden. Ziel der Untersuchungen ist die Anwendbarkeit der Modelle in praktischen Anwendungen bei Fragestellungen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes zu umreißen. Üblicherweise werden mit numerischen Methoden bzw. Ingenieurmethoden des Brandschutzes im Allgemeinen, Brandverläufe und Brandfolgen wie Rauchausbreitung und Wärmeeintrag in Strukturteile in Räumen berechnet. Die meisten empirischen Korrelationen wurden an freien Bränden ermittelt. Um eine Vergleichbarkeit der geometrischen Situation zu schaffen, wurden zwei Experimentreihen mit demselben Brenner durchgeführt. Es kam ein quadratischer Kiesbettbrenner mit einer Seitenlänge von 0,5 m zum Einsatz. An der Unterseite des Brenners wurde ein Propan-Butan-Gemisch eingeströmt und oberhalb des Kiesbettes stabilisierte sich die Flamme.

Im Falle einer als ungestört und frei zu bezeichnenden Umgebung wurden in der Brandversuchshalle der FFB mit einer Grundfläche von ca. 400 m<sup>2</sup> und einer lichten Raumhöhe von ca. 12 m (Setup 1) Brandversuche durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug ca. 15 min. Es wurden unterschiedliche Brandintensitäten (100 kW, 150 kW, 200 kW und 250 kW) untersucht. Die angegebenen Leistungen beziehen sich auf den vollständigen Brennstoffumsatz des eingestellten Massenstromes verbunden mit dem unteren, nominalen Heizwert des Brennstoffgemisches.

In einer zweiten Reihe wurden Versuche in einem Raum mit einer Grundfläche von ca. 25 m<sup>2</sup> durchgeführt, der eine lichte Höhe von ca. 2,60 m aufweist und damit als übliche Raumgeometrie im Hochbau beschrieben werden kann (Setup 2). Die Beflammungsdauer lag bei ungefähr 30 min.

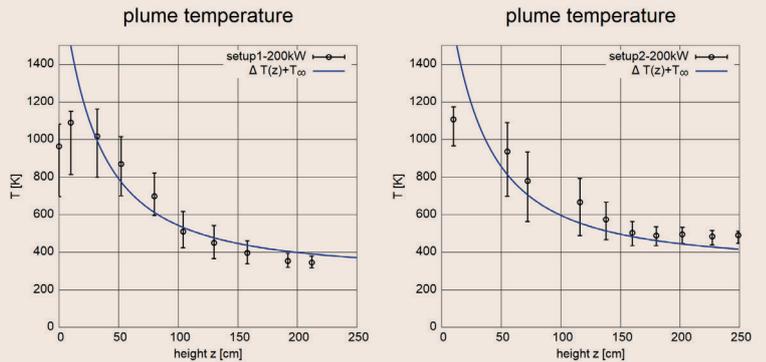
Die Flamme und die darüber aufgehende Rauchgas-säule werden auch als Plume beschrieben. Für diesen gibt es in der Literatur weitreichende Untersuchungen. Heskestad [1] beschreibt beispielsweise die über der Höhe in der Plumemittelachse auftretende Temperaturerhöhung. Die Temperaturmessungen in den Versuchen wurden mit Typ K Mantelthermoelementen durchgeführt. In **Bild 2.10** werden beispielhaft die gemessenen Temperaturen den Werten der empirischen Korrelation gegenübergestellt, für die Versuche mit einer eingestellten Leistung von 200 kW.

Die Abweichungen der Temperaturen sind im Bereich der Flammenwurzel deutlich erkennbar. Hier liegen die Werte der Empirie erwartungsgemäß deutlich von den gemessenen Temperaturen entfernt. Weiter ist zu erkennen, dass die Schwankungen und damit die Bandbreite der Temperaturen zwischen Minimal- und Maximalwerten mit zunehmender Höhe reduziert werden. Hier dominieren die Verdünnungseffekte aus der kälteren, eingesaugten Umgebungsluft, die zu einem Temperaturabfall führen. Die Schwankungen selbst resultieren aus dem für Diffusionsflammen typischen Flackern.

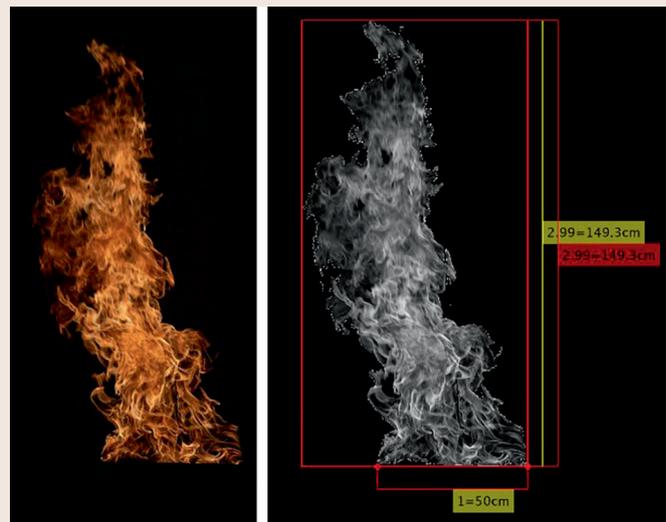
Neben den Plumetemperaturen sollte auch die Flammenlänge der Diffusionsflamme abgeschätzt und mit bekannten empirischen Modellen verglichen werden. Hierfür wurde ein Matlab® Algorithmus entwickelt, um Bildaufnahmen auszuwerten. In **Bild 2.11** ist das Ergebnis der Auswertung zu sehen.

Der Algorithmus ist in der Lage durch die Detektion zusammenhängender Bildbereiche gleicher Helligkeit zwischen Ablösungen der Flamme und dem Flammenfuß zu unterscheiden. Für die freistehenden Brände konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen Werten (200 kW, 129 cm) und den Mittelwerten der Matlab-Ergebnisse nachgewiesen werden, die Flammenablösungen berücksichtigen (200 kW, 135 cm). Im Falle des Raumbrandes konnte eine Videosequenz mit 15.000 Bildern ausgewertet werden (vgl. **Bild 2.12**). Mit Hilfe dieser Bildauswertungsmethode ist es möglich, die Schwankungen der hier untersuchten Diffusionsflamme mit oder ohne Flammenablösungen zu erfassen. Wie erwartet zeigt die in **Bild 2.12** dargestellte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eine Normalverteilung der Flammenhöhe.

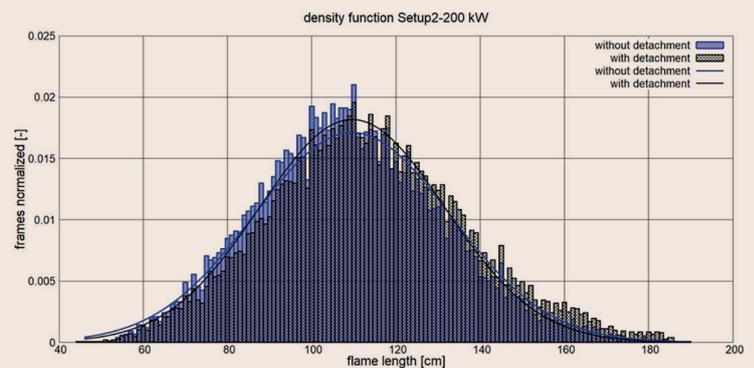
Die im Raumbrand ermittelte mittlere Flammenlänge lag bei 113 cm und ist damit deutlich kürzer als die erwartete Flammenlänge.



**Bild 2.10:** Plumetemperaturen nach Heskestad [2008] blaue Kurve und gemessene Temperaturen (zeitlicher Mittelwert, Minimal- und Maximalwert) links: Setup 1 freie Flamme; rechts: Setup 2 Raumbrand



**Bild 2.11:** Bild der Diffusionsflamme; rechts: Auswertung mit Matlab



**Bild 2.12:** Matlab Auswertung für Raumbrand

Durch das Werkzeug ist es möglich, Flammenlängen in Brandversuchen anhand von Bildaufnahmen schnell und einfach auszuwerten. Es ist möglich Schwankungsgrößen zu ermitteln, die Einfluss auf weitere Feldgrößen haben. Zwischen freistehenden Flammen und Flammen in Räumen sind Unterschiede sowohl in der Plumentemperatur wie auch in der Flammenlänge zu beobachten, die weiter untersucht werden.

## 2.5 DVGW-Forschungsstelle und Prüflaboratorium Gas

Die Abteilung unter der Leitung von Dr. Jens Hoffmann teilt sich in vier Fachbereiche auf. Diese sind die Abteilungen Verbrennungstechnik, Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen, Armaturen und Forschung Gasanwendung. Hauptaugenmerk liegt auf der Prüfung von Gasgeräten und Bauteilen in der Gasversorgung und Komponenten für Gasgeräte. Der Bereich Forschung gewinnt durch die Forcierung des Themenbereichs Wasserstoff zunehmend an Gewicht und deckt auch die Prüfbereiche ab. Nachfolgend findet sich ein Rückblick auf das Jahr 2020 aus Sicht der Akkreditierung, Standardisierung, Prüfung und Forschung.

### **Prüflaboratorium Gas – Akkreditierung**

Im Jahr 2020 stand ein Audit zur Aufrechterhaltung der Akkreditierung an, welches, im Bereich Verbrennungstechnik vertieft, erfolgreich absolviert wurde.

Die Akkreditierungen und Anerkennungen erfolgten im Einzelnen in folgenden Bereichen bzw. für die Richtlinien:

- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- Sicherheit elektrischer Betriebsmittel (SEB)
- Materialprüfungen an Produkten der Gasverteilung und -verwendung
- Probenahme und ausgewählte Prüfungen von Brennstoffen
- Einrichtungen und Ausrüstungsteile in der Gasanwendung und -versorgung
- Prüfung von Bauprodukten gemäß Verordnung (EU) 305/2011
- Prüfungen nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
- Prüfungen nach Gasgeräteverordnung (EU) 2016/426 (GAR).

Weiterhin wurde dem Prüflaboratorium als einzige Gas-Prüfstelle auch die Kompetenz für die „interne Kalibrierung“ von Temperaturmess- und Klimaschränken bescheinigt. Hinzu kommen internationale Akkreditierungen für IECCE-Prüfungen (*International Commission on the Rules for the Approval of Electrical Equipment*) („CB Testing Laboratory“).

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass es dem Prüflabor möglich ist, die Prüfungen aller Komponenten und Materialien sowie Sicherheitseinrichtungen

der Gasversorgung und -nutzung, der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischer Phänomene, sofern anwendbar, im Komplettpaket durchzuführen.

Daneben besteht außerdem die Anerkennung als Prüflabor für DIN CERTCO für Warmluftzeuger, Ölbrenner- und -heizkessel, Temperaturregel- und Begrenzungseinrichtungen für Wärmeerzeugungsanlagen, diverse Regel- und Steuereinrichtungen sowie Wassererwärmer und Wassererwärmungsanlagen für Trink- und Betriebswasser. Die Kompetenzen des Prüflaboratoriums, gestützt durch die intensive Teilnahme an der Regelsetzung und die Kooperation mit zahlreichen europäischen Stellen, ermöglichen die erfolgreiche Anwendung von Prüfverfahren für neue Technologien im Hinblick auf Energieeffizienz und Sicherheitstechnik unterschiedlicher Brennstoffanwendungen. Dies wirkte sich vor allem auf Produktentwicklungsprojekte mit komplexen Schnittstellen und Wechselwirkungen positiv aus. Durch die bestehenden, umfassenden Akkreditierungen des Prüflaboratoriums konnten für die unterschiedlichen Bereiche belastbare Konformitätsnachweise erstellt werden. Das Themenfeld der Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie (Richtlinie 2009/125/EG) wird durch Mitarbeiter/innen des Prüflaboratoriums weiterhin, auch durch Beteiligung an Europäischen Gremien, unterstützt.

### **Prüflaboratorium Gas – Normung und Standardisierung**

Auch im zurückliegenden Jahr setzten sich die Mitarbeiter/innen des Prüflaboratoriums im Rahmen der Regelsetzung, neben den DVGW-internen Gremien und Ausschüssen, vor allem auch in nationalen (ca. 55 Ausschüsse in NAGas, NHRS, FNH, DKE), europäischen (CEN, CENELEC, EU-Kommission) und internationalen (IEC, ISO) Gremien (25 europäische und internationale Gremien zzgl. Arbeitsgruppen) für die Ziele des DVGW ein. In einigen exponierten Stellen belegen Prüfstellenmitarbeiter auch Positionen im Vorsitz der Gremien.

Hierbei werden z. B. in den Projektkreisen des Technischen Komitees „Bauteile und Hilfsstoffe“ sowie „Gasarmaturen“ bisherige DVGW-Prüfgrundlagen sukzessive in DIN-Normen überführt (Träger NAGas). Dabei gilt es zu bemerken, dass die Europäischen Prüfnormen unverändert gültig sind, da sie kürzlich neu herausgegeben bzw. bestätigt wurden.

In den Technischen Komitees des CEN (z. B. TC 69, TC 109, TC 234, TC 235, TC 236) wurde damit begonnen, Anforderungen und Prüfmethoden zur Wasserstoffeignung der Bauteile und Geräte auszuarbeiten. Der systematische Aufbau der H<sub>2</sub>-Kompetenz im DVGW und damit der nationalen und europäischen Normung soll durch ein Investitionsprogramm aus Forschungsrücklagen und Vereinsmitteln gefördert werden. Die Technischen Komitees sind

aufgefordert, hierzu Kernthemen zu benennen, die durch Forschungsvorhaben oder andere Zuarbeiten unterstützt werden sollen. So wurde beispielsweise im TK „Gasarmaturen“ die Neugründung zweier Projektkreise zum Thema H<sub>2</sub>-Readiness für Neu- und Bestandsarmaturen initiiert (tätig seit Februar 2020).

### **Prüflaboratorium Gas – Prüftätigkeiten**

Im Bereich Verbrennungstechnik war neben der Beteiligung bei Untersuchungen an wasserstofforientierten Projekten die initiative Entwicklung einer Prüfvorschrift für die Zertifizierung von Gasgeräten zum Betrieb mit Methan/Wasserstoff-Gemischen (bis 20 % H<sub>2</sub>-Zumischung) eine herausragende Aktivität. In Zuge der zunehmenden Aktivitäten in der Gaswelt wurden zahlreiche Heizgeräte mit wasserstoffhaltigen Gemischen geprüft. Auch im Rahmen der Gasgeräteamaturen konnte eine Zunahme der Projekte bzgl. der Anwendung von Wasserstoff festgestellt werden.

Trotz der Auswirkungen durch COVID-19 waren die Anzahl der Prüfaufgaben in den Bereichen Verbrennungstechnik und Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen und die Anfragen der Hersteller weitestgehend beständig und konnten zuverlässig abgearbeitet werden.

Im Bereich der Armaturen konnten pandemiebedingt kaum Vor-Ort-Prüfungen durchgeführt werden, was im Wesentlichen die Überwachung der zertifizierten Produkte betraf. So musste die Probenahme für die sogenannten Kontrollprüfungen (1/3 des Umsatzes) im Wesentlichen den Zertifikatinhabern übertragen werden, die Prüfungen erfolgten im Prüflaboratorium nach Zusage der ausgewählten Proben. Dadurch kam es zu zeitlichen Verzögerungen und Mehraufwand. Dennoch konnten alle der Prüfstellen auferlegten Überwachungstätigkeiten fristgerecht durchgeführt werden.

Weiterhin konnte zur weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit und der Kundenzufriedenheit die maschinelle Ausstattung des Bereichs um einen Zugprüfstand der Fa. Form + Test Prüfsysteme, Riedlingen, erweitert werden. Die technischen Daten dieses Prüfstandes sind:

- max. Prüfkraft 200 kN
- Prüfraumhöhe 2700 mm
- Prüfraumbreite 660 mm
- Messbereich 2 bis 200 kN
- Prüfgeschwindigkeit 0,001 bis 300 mm/min
- gleichzeitige Innendruckbeaufschlagung bis 400 bar mit Wasser.

Der Zugprüfstand wurde im Dezember 2020 von Mitarbeitern des Prüflaboratoriums beim Hersteller abgenommen, ist inzwischen ausgeliefert und in Betrieb genommen. Weiterhin ist es damit möglich, die Hersteller auch außerhalb des Zertifizierungsprozess, z. B. im Entwicklungsprozess mit neuen Materialien, zu unterstützen.

### **Prüflaboratorium Gas – Forschung und Entwicklung**

Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten bildeten in 2020 weiterhin mehrere Wasserstoffprojekte. Die Forschung lieferte auch die Grundlagen für die Erstellung z. B. des Zertifizierungsprogramms ZP 3100 der DVGW CERT für 20 Vol.-% Wasserstoffbeimischung, welches Ende 2020 veröffentlicht wurde. Neben der Fortführung der im Jahr 2019 gestarteten Projekte, z. B. EU-Projekt THyGA (*Testing Hydrogen Admixtures for Gas Applications*), DVGW-Projekt G 201902 „Wasserstoff in der Gasinfrastruktur: DVGW/Avacon-Pilotvorhaben mit bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff-Einspeisung in Erdgas“ (H<sub>2</sub>-20) und DVGW-Projekt G 201901 „Roadmap Gas 2050“, konnte auch die technisch-wissenschaftliche Begleitung der „Wasserstoff-Insel Öhringen“ der Netze BW eingeworben werden. Bei der „Wasserstoff-Insel Öhringen“ strebt der Netzbetreiber in einem kleinen Inselnetz mit ca. 30 Gasanschlussnehmern die Beimischung bis zu 30 Vol.-% Wasserstoff im Bestand an. Bei der Beimischung von 30 Vol.-% Wasserstoff können energieäquivalent 12 % CO<sub>2</sub>-Reduktionen gegenüber Methan erzielt werden, bei 20 Vol.-% fällt die Reduktion mit 7,4 % etwas geringer aus.

### **Testing Hydrogen Admixture for Gas Applications – THyGA**

Der Gewerbe- und Wohnungssektor stellt mit ca. 200 Mio. Geräten den größten Erdgasverbrauch in der Europäischen Union dar. In diesen Bereich entfallen damit etwa 40 % des europäischen Gesamtgasverbrauchs [2]. Ein möglicher Ansatz, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren, wäre das Zumischen von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien (Low-Carbon Hydrogen) [3] in die vorhandenen Erdgasnetze. Hier ist es das Ziel des THyGA Projektes Wissenslücken zu schließen, um die breite Nutzung von Wasserstoff-Erdgasgemischen zu ermöglichen [2].

Hierfür wurde eine Segmentierung von vorhandenen Technologien, die sich auf dem Europäischen Markt befinden, vorgenommen und diese kategorisiert, um ein repräsentatives Bild der Endverbrauchergeräte darzustellen. Aus diesen Gerätepopulationen wurde dann ein Querschnitt ausgesucht, der von verschiedenen Laboren/Projektpartnern nach einem definierten Prüfplan vermessen wird [4].

Das Prüflaboratorium Gas ist in diesem Projekt stark vertreten, vor allem bei der Charakterisierung einer großen Anzahl von Endgeräten bei unterschiedlichen Wasserstoffbeimischungen. Zu diesem Zweck hat das Prüflaboratorium Gas eine Mischanlage zur Herstellung verschiedener Wasserstoffgasgemische geplant und aufgebaut. Hierdurch gibt es die Möglichkeit, Gasgemische mit einer Wasserstoffkonzentration von 1-99 % herzustellen, um für die Projekte verschiedene Erdgasqualitäten zu simulieren.

Die Ergebnisse aus den Messungen der Projektpartner und vom Prüflaboratorium Gas werden im Verlauf dieses

Projektes analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse werden genutzt, um Standards für die Prüfung von Feuerungsanlagen bei Erdgas/Wasserstoff Mischungen zu schaffen.

**H<sub>2</sub>-20**

Das DVGW-Projekt H<sub>2</sub>-20 untersucht die Wasserstoffzumischung von bis zu 20 Vol.-% in einem Bestandsgebiet des Netzbetreibers und Projektpartners Avacon Netz GmbH in der Modellregion Fläming, die Projektkoordination liegt bei der DVGW-Forschungsstelle. Die Region wurde u. a. auch wegen des hohen Anteils erneuerbarer Stromerzeugung ausgewählt, was **Bild 2.13** andeuten soll.

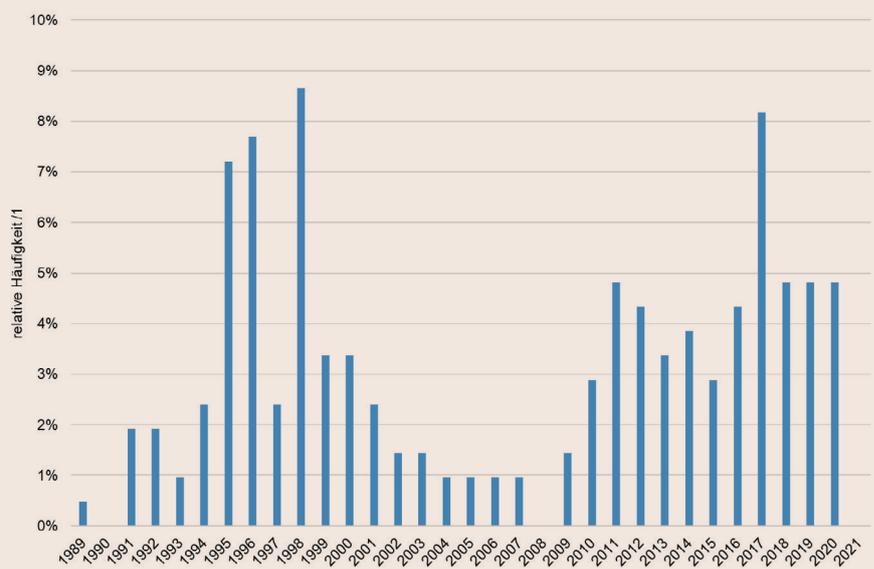


**Bild 2.13:** Gasdruckregelanlage Schopisdorf mit einer von zahlreichen Windkraftanlagen in der Region Fläming, Quelle: DVGW-EBI

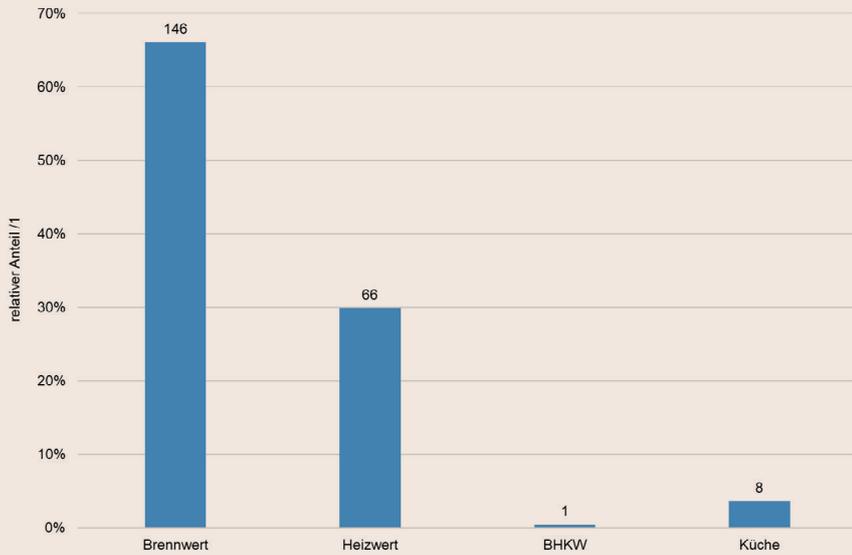
Im Januar 2020 startete die praktische Umsetzung mit Informationsveranstaltungen der Vertragsinstallationsunternehmen und Schornsteinfeger. Die Bürgerversammlungen mussten coronabedingt von März in den September 2020 verschoben werden. Direkt im Anschluss wurden die umfangreichen Ersterhebungen der ca. 340 Haushalte durch das beauftragte Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. gestartet. Bis Ende 2020 konnten bereits 224 Datensätze erfasst werden. Die Altersverteilung zeigt **Bild 2.14** mit einer bimodalen Altersverteilung der Gasgeräte in dem Netzgebiet, das 1994 errichtet wurde. Einige ältere Gasgeräte wurden von Flüssiggasbetrieb auf Erdgasbetrieb umgerüstet.

Den höchsten Anteil haben Gasbrennwertgeräte, gefolgt von Heizwert-, wenigen Küchengeräten und einem Blockheizkraftwerk (BHKW) (**Bild 2.15**). Bei der Ersterhebung wurden alle Geräte auch mit dem Prüfgas G 222 mit 23 Vol.-% Wasserstoff auf Funktion und Emissionen geprüft. Die positiven Auswirkungen der Wasserstoffbeimischung zeigen **Bild 2.16** und **2.17** mit einer deutlichen Reduktion der Emissionen an Kohlenmonoxid bzw. Stickoxiden, wenngleich die Erdgas-Messungen für den technisch und altersmäßig sehr heterogenen Bestand bereits auf niedrigem Niveau lagen.

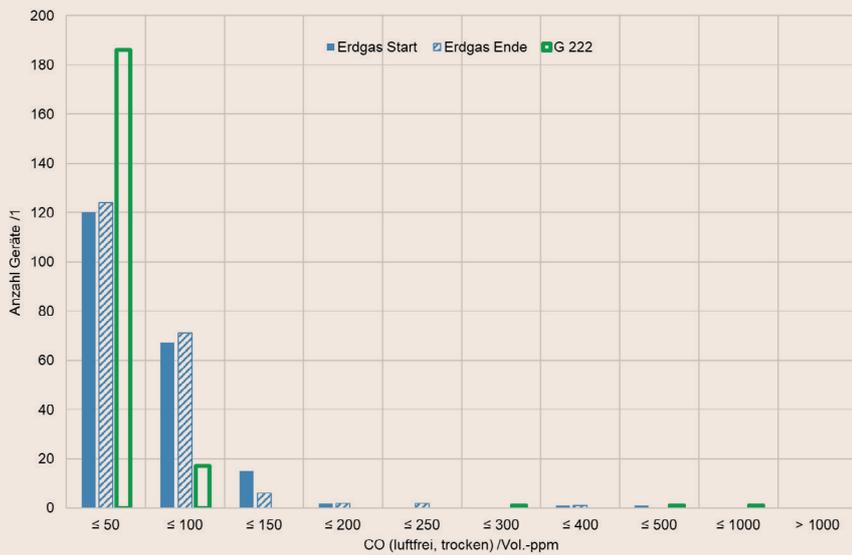
Die **Bilder 2.16** und **2.17** verdeutlichen den bereits bekannten Trend bei häuslichen Wärmeerzeugern [5], dass die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen tendenziell durch die Wasserstoffbeimischung abgesenkt werden. Bei Beaufschlagung der Geräte mit G 222 reduzierten sich bei Vollast im Mittel die CO-Emissionen um ca. 35 % und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um ca. 23 % gegenüber den Messungen mit Erdgas. Bei Kleinlast lagen die Reduktionen bei 9 % für CO und ca. 31 % für NO<sub>x</sub>. Die Ergebnisse werden fort-



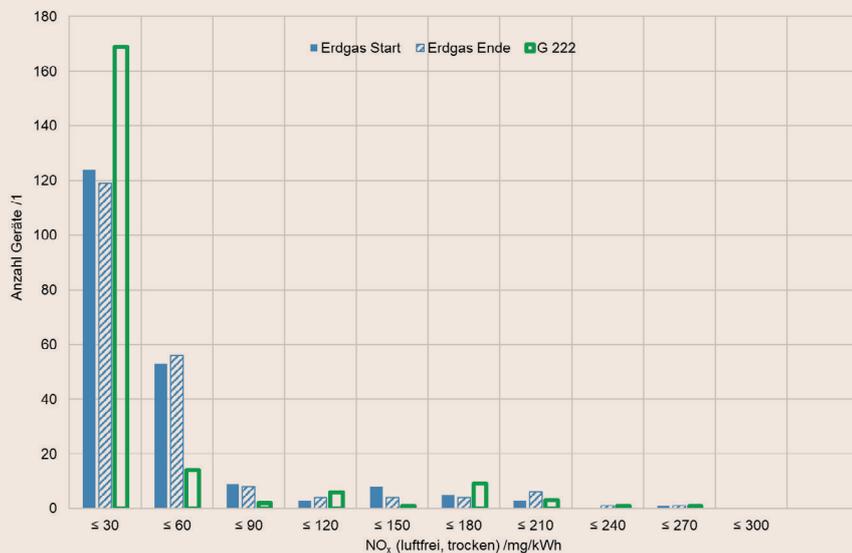
**Bild 2.14:** Altersverteilung der erhobenen Gasgeräte Ende 2020, Quelle: DVGW-EBI



**Bild 2.15:** Verteilung der Gasgerätearten Ende 2020, Quelle: DVGW-EBI



**Bild 2.16:** Anzahl der Geräte über CO-Emissionen (luftfrei, trocken) bei Vollast für den technisch und altersmäßig heterogenen Bestand, die CO-Emissionen fielen im Mittel bei G 222 um ca. 35 % niedriger als bei den Messungen mit Erdgas aus, Quelle: DVGW-EBI



**Bild 2.17:** Anzahl der Geräte über NO<sub>x</sub>-Emissionen (luftfrei, trocken) bei Vollast für den technisch und altersmäßig heterogenen Bestand, die NO<sub>x</sub>-Emissionen fielen im Mittel bei G 222 um ca. 23 % niedriger als bei den Messungen mit Erdgas aus, Quelle: DVGW-EBI

laufend durch das Projektteam auch unter Einbindung der Gerätehersteller analysiert, um das hohe Sicherheitsniveau der Gasverwendung auch bei der Wasserstoffbeimischung beizubehalten. Die bisherigen Ergebnisse sehen sehr vielversprechend aus. Die Erhebungen laufen auch in 2021 unter Corona-Bedingungen weiter, mit einem Beginn der Einspeisung wird für die Heizsaison 2021/2022 gerechnet.

Weitere Projekte behandeln vor allem die Themen brennstoffflexible Verbrennungsregelungen und die Bestimmung der Wasserstoffverträglichkeiten, um industriellen Partnern Daten und Lösungen für die Zukunft bereitstellen zu können.

## Literatur

- [1] Heskestad, G.: Fire Plumes. In: DiNenno P.J. (ed.): The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269, (1995), p. 2/9, 2<sup>nd</sup> Ed.
- [2] Leicher, J. et. al.: Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part I: Theory, (2020).
- [3] Brändle, G. et. al.: Estimating long-term global supply costs for lowcarbon hydrogen; EWI Working Paper (2020), Nr. 20/04 ISSN: 1862-3808.
- [4] Flayyih, M. et. al.: Market segmentation of domestic and commercial natural gas appliances, Deliverable report 2.1 (2020), thyga-project.eu/wp-content/uploads/20210125\_D2.1\_Market-Segmentation\_final.pdf
- [5] Dörr, H.; Kröger, K.; Nitschke-Kowsky, P.; Senner, J.; Tali, E.; Feldpausch-Jägers, S.: Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz – Auswirkungen auf den Betrieb von Gasanwendungstechnologien im Bestand, auf Gas-Plus-Technologien und auf Verbrennungsregelungsstrategien, DVGW e.V., Bonn (2016).

## 2.6 Veröffentlichungen des Teilinstituts Verbrennungstechnik 2020

### Journal- und Buchveröffentlichungen

- Augustin, D.; Schoeps, F.: Brandversuche mit modernem Mobiliar, BRANDSchutz (2020) Nr. 9/2020.
- Brändle, G.; Schönfisch, M.; Schulte, S.: Estimating long-term global supply costs for lowcarbon hydrogen; EWI Working Paper (2020) Nr. 20/04 ISSN: 1862-3808.
- Flayyih, M.; Schaffert, J.; Burmeister, F.; Albus, R.; Görner, K.; Milin, P.; Carpentier, S.; Krishnaramanujam, K.; Endisch, J.; de Wit, K.; Geerts, E.; Schweitzer, J.: Market segmentation of domestic and commercial natural gas appliances, Deliverable report 2.1 (2020), thyga-project.eu/wp-content/uploads/20210125\_D2.1\_Market-Segmentation\_final.pdf
- Hagen, F. P.; Rinkenburger, A.; Günther, J.; Bockhorn, H.; Niessner, R.; Suntz, R.; Loukou, A.; Trimis, D.; Haisch, C.: Spark discharge-generated soot: Varying nanostructure and reactivity against oxidation with molecular oxygen by synthesis conditions, Journal of Aerosol Science 143 (2020), S. 105530, (doi:10.1016/j.jaerosci.2020.105530).
- Hagen, F. P.; Bockhorn, H.; Störmer, H.; Loukou, A.; Suntz, R.; Trimis, D.: Nanostructural and morphological characteristics of single soot

aggregates during low-temperature oxidation, Proceedings of the Combustion Institute 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.06.338).

- Hansinger, M.; Zirwes, T.; Zips, J.; Pfitzner, M.; Zhang, F.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.: The Eulerian stochastic fields method applied to large eddy simulations of a piloted flame with inhomogeneous inlet, Flow, Turbulence and Combustion 105 (2020), S. 837-867, (doi:10.1007/s10494-020-00159-5).
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahre 2019; DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Teil 1, gwf-Wasser I Abwasser (2020) Nr. 6.
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahre 2019; DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Teil 2, gwf Gas + Energie (2020) Nr. 7-8.
- Häber, T.; Bockhorn, H.; Suntz, R.: Two-dimensional tomographic simultaneous multi-species visualization-part I: Experimental methodology and application to laminar and turbulent flames, Energies 13 (2020) Nr. 9, S. 2335, (doi:10.3390/en13092335).
- Häber, T.; Suntz, R.; Bockhorn, H.: Two-dimensional tomographic simultaneous multispecies visualization—Part II: Reconstruction accuracy, Energies 13 (2020) Nr. 9, S. 2368, (doi:10.3390/en13092368).
- Koch, S.; Kubach, H.; Velji, A.; Koch, T.; Hagen, F. P.; Bockhorn, H.; Loukou, A.; Trimis, D.; Suntz, R.: Impact of injection strategy on soot reactivity and particle properties of a GDI engine, SAE International Technical Paper (2020) Nr. 2020-01-0392, (doi:10.4271/2020-01-0392).
- Leicher, J.; Schaffert, J.; Cartenier, S.; Albus, R.; Görner, K.: Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part I: Theory, Deliverable report 2.2, [https://thyga-project.eu/wp-content/uploads/20200703-D2.2-Impact-of-hydrogen-admixture-on-combustion-processes-%E2%80%93-Part-I\\_Theory.pdf](https://thyga-project.eu/wp-content/uploads/20200703-D2.2-Impact-of-hydrogen-admixture-on-combustion-processes-%E2%80%93-Part-I_Theory.pdf).
- Max, D.: Mehr Akzeptanz durch praktische Anwendung, FeuerTRUTZ Magazin (2020) Nr. 4, S. 86-88.
- Schelb, D.; Dinkov, I.: Brandverhalten von Kunst- und Schaumstoffen in Notunterkünften, BRANDSchutz (2020) Nr. 12/2020.
- Sentko, M. M.; Schulz, S.; Stelzner, B.; Anderlohr, C.; Vicari, M.; Trimis, D.: Determination of temperature and water-concentration in fuel-rich oxy-fuel methane flames applying TDLAS, Combustion and Flame 214 (2020), S. 336-245, (doi:10.1016/j.combustflame.2020.01.003).
- Steinhausen, M.; Luo, Y.; Popp, S.; Strassacker, C.; Zirwes, T.; Kosaka, H.; Zentgraf, F.; Maas, U.; Sadiki, A.; Dreizler, A.; Hasse, C.: Numerical investigation of local heat-release rates and thermo-chemical states in sidewall quenching of laminar methane and dimethyl ether flames, Flow, Turbulence and Combustion (2020), in press, (doi:10.1007/s10494-020-00146-w).
- Wang, Y.; Zhang, H.; Zirwes, T.; Zhang, F. B. H.; Zheng, C.: Ignition of dimethyl ether/air mixtures by hot particles: Impact of low temperature chemical reactions, Proceedings of the Combustion Institute 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.06.254).
- Wipfler, R.; Augustin, D.: Brandverhalten von „Tifontaine“ – Fackeln, BRANDSchutz (2020) Nr. 7/2020.
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Häber, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Suntz, R.: Near wall dynamics of premixed flames, Proceedings of the Combustion Institute 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.06.058).

- Zhang, F.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Numerical simulations of turbulent flame propagation in a fan-stirred combustion bomb and Bunsen-burner at elevated pressure, *Flow, Turbulence and Combustion* (2020), in press, (doi:10.1007/s10494-020-00209-y).
- Zhang, F.; Heidarifatasmi, H.; Harth, S.; Zirwes, T.; Wang, R.; Fedoryk, M.; Sebbar, N.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Bockhorn, H.: Numerical evaluation of a novel double-concentric swirl burner for sulfur combustion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133 (2020), S. 110257, (doi:10.1016/j.rser.2020.110257).
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Müller, T.; Wachter, S.; Jakobs, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Kolb, T.: Effect of elevated pressure on air-assisted primary atomization of coaxial liquid jets: basic research for entrained flow gasification, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134 (2020), S. 110411, (doi:10.1016/j.rser.2020.110411).
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Quasi-DNS dataset of a piloted flame with inhomogeneous inlet conditions, *Flow, Turbulence and Combustion* 104 (2020) Nr. 4, S. 997-1027, (doi:10.1007/s10494-019-00081-5).
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Wang, Y.; Habisreuther, P.; Denev, J. A.; Chen, Z.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: In-situ flame particle tracking based on barycentric coordinates for studying local flame dynamics in pulsating Bunsen flames, *Proceedings of the Combustion Institute* 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.07.033).
- Beiträge auf Konferenzen**
- Appel, D.; Hagen, F. P.; Wagner, U.; Koch, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Influence of low ambient temperatures on the exhaust gas and deposit composition of gasoline engines. ASME 2020 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, American Society of Mechanical Engineers (ASME), online, November 4-6, 2020, (doi:10.1115/ICEF2020-2932).
- Fedoryk, M. Z. F.; Heidarifatasmi, H. S. N.; Harth, S.; Trimis, D.: Experimental and numerical investigations of a high-power density sulphur burner. 12<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, (22), online/live, Porto, Portugal, November 10-11, 2020.
- Galeazzo, F. C. C.; Zhang, F.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Zarzalis, N.; Trimis, D.: Vortrag: Implementation of an efficient synthetic inflow turbulence-generator in the open-source code OpenFOAM for 3D LES/DNS applications. 23<sup>rd</sup> Results and Review Workshop of the HLRS, online, Oct. 08-09, 2020.
- Langenthal, T. von; Zarzalis, N.; Loukou, A.: Experimental two-phase flow analysis inside a laboratory scale jet-engine combustion chamber using PIV. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2020), ASME, September 21-25, Virtual Conference, GT2020-16305, 2020, (doi:10.1115/GT2020-16305).
- Martinos, A.; Zarzalis, N.; Harth, S.: Analysis of ignition processes at combustors for aero engines at high altitude conditions with and without effusion cooling. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2020), ASME, September 21-25, Virtual Conference, GT2020-16305, 2020, (doi:10.1115/GT2020-16173).
- Langone, L.; Sedlmaier, J.; Nassini, P. C.; Mazzei, L.; Harth, S.; Andreini, A.: Numerical modeling of gaseous partially premixed low-swirl lifted flame at elevated pressure. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2020), ASME, September 21-25, Virtual Conference, GT2020-16305, 2020, (doi:10.1115/GT2020-16305).
- Schneider, M.; Weinbrecht, P.; Wieland, C.; Weis, C.; Trimis, D.: Energy efficient coil coating process - ECCO. 12<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Nr. 14, Online Conference, Porto, Portugal, November 10-11, 2020.
- Tavakkol, S.; Zirwes, T.; Denev, J. A.; Jamshidi, F.; Bockhorn, H.: Development of an OpenFOAM solver for numerical simulation of carbonization of biomasses in rotary kilns. The 15<sup>th</sup> OpenFOAM Workshop, Washington, DC, USA, June 22-25, 2020.
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Denev, J. A.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Lagrangian tracking of material surfaces in reacting flows. The 15<sup>th</sup> OpenFOAM Workshop, Washington, DC, USA, June 22-25, 2020.
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Denev, J. A.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Poster: Implementation of Lagrangian surface tracking for high performance computing. 23<sup>rd</sup> Results and Review Workshop of the HLRS, online, Oct. 08-09, 007-Rea-DNSbomb, 2020.

## Autoren



Prof. Dr. rer. nat. **Harald Horn**  
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) |  
Karlsruhe |  
Tel.: +49 721 608 42580 |  
harald.horn@kit.edu



Prof. Dr.-Ing. **Thomas Kolb**  
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) |  
Karlsruhe |  
Tel.: +49 721 608 42561 |  
thomas.kolb@kit.edu



Prof. Dr.-Ing. **Dimosthenis Trimis**  
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) |  
Karlsruhe |  
Tel.: +49 721 608 42570 |  
dimosthenis.trimis@kit.edu



Dr. rer. nat. **Josef Klinger**  
Technologiezentrum Wasser |  
Karlsruhe |  
Tel.: +49 721 9678 110 |  
josef.klinger@tzw.de