Jahrgang 164

SONDERDRUCK

aus gwf Gas + Energie 06/2023 + 07-08/2023 und gwf-Wasser|Abwasser 06/2023

> Vulkan-Verlag GmbH www.gwf-wasser-abwasser.de

Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2022

Engler-Bunte-Institut des KIT, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe

Harald Horn, Thomas Kolb und Dimosthenis Trimis



Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2022

Engler-Bunte-Institut des KIT, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe

Thomas Kolb, Dimosthenis Trimis, Harald Horn

Forschung und Lehre, Tätigkeitsbericht, Ausbildung

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. Wie auch in den vergangenen Jahren erscheinen die gasspezifischen Beiträge im gwf Gas + Energie (Teil 1: Ausgabe 6/2023, EBI ceb; Teil 2: Ausgabe 7-8/2023, EBI vbt) und die wasserspezifischen Beiträge im gwf-Wasser | Abwasser (Teil 3: Ausgabe 6/2023, EBI WCT). Typischerweise steht die Entwicklung der verschiedenen Einrichtungen mit Beiträgen aus der universitären Lehre, der Aus- und Weiterbildung, über Forschungsund Entwicklungsprojekte, über Beratung und Firmenkontakte im Fokus. Wie bereits im Jahr 2021 wirkte sich auch 2022 die Corona-Pandemie sehr weitreichend auf die Organisation der Forschungsarbeiten und auf die Durchführung der verschiedenen Studiengänge aus, in denen die Lehrenden des Engler-Bunte-Instituts eingebunden sind.

Zur Geschichte und zum Umfeld

Das Engler-Bunte-Institut (EBI) am Karlsruher Institut für Technologie ist hervorgegangen aus der 1907 gegründeten "Lehr- und Versuchsgasanstalt" und führt seit 1971 den Namen "Engler-Bunte-Institut". Die enge Verbindung zu praxisrelevanten Fragestellungen des Gas- und Wasserfaches äußert sich darin, dass die Stelleninhaber der Professuren "Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie", "Verbrennungstechnik" und "Wasserchemie und Wassertechnologie" parallel auch die Leitung der entsprechenden Bereiche der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT inne haben.

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist in der internationalen Forschungslandschaft eine feste Größe. Seit 2015 wird am KIT ein übergeordneter Strategieprozess (Dachstrategie KIT 2025) umgesetzt, der als Konsequenz des zuvor erarbeiteten Leitbilds des KIT angesehen werden kann. Das KIT hat sich 2015 zum Ziel gesetzt, maßgeblich Beiträge zu den Feldern Energie, Mobilität und Information zu leisten. 2019 konnte das KIT im Rahmen der Exzellenzstrategie von Bund und Ländern mit dem Leitmotiv "Living the Change" in den Kreis der Exzellenzuniversitäten in Deutschland zurückkehren.

Im Bereich Energie leistet das EBI seit Jahrzehnten einen wichtigen Beitrag, indem es das KIT-Leitbild mit relevanten Forschungsfragen/-projekten und der Ausbildung des ingenieurund naturwissenschaftlichen Nachwuchses in die Praxis umsetzt. So sieht das KIT sich "in der Verantwortung, durch Forschung und Lehre Beiträge zur nachhaltigen Lösung großer Aufgaben von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu leisten". "Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften sowie Geistes- und Sozialwissenschaften bilden den Fächerkanon des KIT. Mit hoher interdisziplinärer Wechselwirkung erschließen sie Themenstellungen von den Grundlagen bis zur Anwendung, von der Entwicklung neuer Technologien bis zur Reflexion des Verhältnisses Mensch und Technik. Um dies bestmöglich zu erreichen, erstreckt sich die Forschung am KIT über die gesamte Bandbreite: von der Grundlagenforschung bis zu industrienaher, angewandter Forschung, von kleinen Forschungsvorhaben bis zu langfristigen Großforschungsprojekten."



Bild 0.1: Aktuelle Organisationsstruktur des Engler-Bunte-Instituts und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut.

Bild 0.3: Experimenteller Aufbau. Li-oben: Gegenstrombrenner, unten Laseroptischer Aufbau für Lll, Re-oben: untersuchte Flammen.

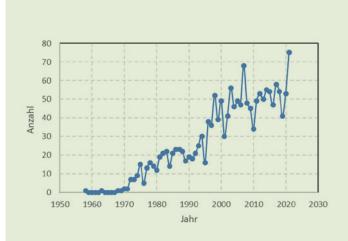


Bild 0.2: Anzahl (pro Jahr) der in scopus.com gelisteten Publikationen aus dem Engler-Bunte-Institut seit 1958.









Sowohl die Forschungsgruppen am Engler-Bunte-Institut des KIT als auch die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT tragen seit Jahren mit einer sehr hohen internationalen Sichtbarkeit im Rahmen von Forschungs- und Lehrtätigkeit in den Themenfeldern Energie und Umwelt wesentlich zur Umsetzung des KIT-Leitbilds bei. Das aktuelle Organigramm des Engler-Bunte-Instituts ist in **Bild 0.1** dargestellt.

Forschung und Beratung am Engler-Bunte-Institut

Sowohl die Forschungsgruppen am EBI als auch die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT konnten 2022 zahlreiche neue Projekte einwerben. Einzelne Forschungsprojekte werden in den Berichten der Forschungsgruppen detaillierter dargestellt. Die im Besonderen im Bereich der zukünftigen Herstellung und Nutzung von Wasserstoff aufkommenden Fragestellungen werden vor allem an der DVGW-Forschungsstelle in der Abteilung Gastechnologie und im Prüflaboratorium Gas bearbeitet. Neben der Förderung unserer Forschung durch die öffentliche Hand wird ein erheblicher Anteil der Forschungspro-

jekte auch durch Aufträge aus Industrie und Unternehmen finanziert.

Wie auch in den Jahren zuvor ist die Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts ein sehr wertvoller Partner, sie unterstützt die Forschung am Engler-Bunte-Institut seit Jahren zuverlässig. Umfang und Erfolg unserer Forschungsarbeiten spiegeln sich auch in der Publikationsaktivität des Engler-Bunte-Instituts, die über die letzten sechs Jahrzehnte in **Bild 0.2** dokumentiert ist (Scopus.com, 11.03.2023)

Lehre und Ausbildung

2022 war die Lehre am KIT immer noch beeinträchtigt durch die Corona-Pandemie. Erst im WS 2022/23 wurde der Präsenzbetrieb wieder erfolgreich aufgenommen. Im WS 2022/23 konnten wir im Studiengang Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik 134 Bachelor- und 70 Master-Studierende begrüßen, im Bioingenieurwesen waren dies 55 Bachelor- und 20 Masterstudierende. Damit konnten die Studierendenzahlen in etwa konstant gehalten werden. Der englischsprachige Master-Studiengang "Water

Science and Engineering" verzeichnet dagegen eine stetig steigende Anzahl von Bewerbungen (> 300 pro Jahr), von denen in 2022 aber nur rund 20 zugelassen wurden.

Besonders erfolgreiche studentische Arbeiten werden von der **Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts** im Rahmen des Tags der GdF des EBI ausgezeichnet, der in 2022 am 24. Juni wieder in Präsenz stattfinden konnte. Der **Preis für die beste Masterarbeit** ging im Jahr 2022 an Herrn M.Sc. Maurus Bauer für seine Masterarbeit zum Thema "Nanostruktur und Größenverteilung von Kohlenstoffnanopartikeln in Gegenstromflammen mittels zeitaufgelöster laserinduzierter Inkandeszenz bei drei Anregungswellenlängen", siehe **Bild 0.3**.

Der folgende detailliertere Tätigkeitsbericht enthält wie in den letzten Jahren Beiträge der drei Institutsteile am Engler-Bunte-Institut, der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.

1. Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie, EBI ceb und Bereich Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle

Thomas Kolb, Reinhard Rauch, Siegfried Bajohr, Frank Graf

1.1 Lehre

Der Institutsteil Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie, EBI ceb, befasst sich in Lehre und Forschung mit der Verfahrenstechnik und Chemie der Brennstoffumwandlung und -aufbereitung.

Die Forschungsarbeiten EBI ceb konzentrieren sich auf fossile und biogene Brennstoffe, deren verfahrensspezifische Charakterisierung sowie die Verfahrenstechnik und Chemie der Brennstoffumwandlung und Aufbereitung, insbesondere bei hohem Druck. Weitere Arbeitsschwerpunkte sind die Synthese von Brennstoffen, neue Bio-Brennstoffe sowie die Nutzung chemischer Energieträger als Energiespeicher und Grundstoffe für die chemische Industrie.

Die grundlagenorientierten F&E-Arbeiten am EBI ceb werden ergänzt durch die Arbeiten zur Flugstromvergasung der Abteilung Vergasungstechnologie, ITC vgt, am Institut für Technische Chemie, Campus Nord. Durch die enge Verbindung zwischen EBI ceb und ITC vgt werden die anwendungsnahen Forschungseinrichtungen des Campus Nord auch für die Ausbildung der Studierenden genutzt.

Der dem EBI ceb angeschlossene Bereich Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, DVGW gt, befasst sich mit der Technik und den Verfahren der Gaserzeugung, -verteilung und -verwendung. Die enge thematische Verknüpfung von EBI ceb und DVGW gt fördert die Bearbeitung von Forschungsthemen von den Grundlagen bis zur technischen Anwendung.

In der Lehre vertritt das EBI ceb das Vertiefungsfach "Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie" des Masterstudiengangs der KIT-Fakultät Chemieingenieurwesen/Verfahrenstechnik, ciw/vt. Die Vorlesungen "Grundlagen der Brennstofftechnik", "Energieträger aus Biomasse", "Raffinerietechnik", "Katalytische Verfahren der Gastechnik", "Technical Systems for Thermal Waste Treatment" und "Wirbelschichttechnik" werden von den Lehrenden des EBI ceb angeboten. Die Vorlesungen im Vertiefungsfach werden ergänzt durch Vorlesungen aus der Verbrennungstechnik, EBI vbt und aus anderen Instituten des KIT.

Das EBI ceb trägt darüber hinaus wesentlich zu den Grundlagenfächern der Studiengänge der Fakultät bei. Die Vorlesung "Prozess- und Anlagentechnik", die als einzige Vorlesung verpflichtend für alle Studierenden der Masterstudiengänge ciw/vt/biw ist, vertieft die ingenieurstechnischen Grundlagenkenntnisse, erweitert die Kompetenzen in der Bewertung von technischen Prozessen und Verfahren und zeigt Beispiele für die technische Anwendung. Das integrierte Praktikum an der bioliq*-Pilotanlage im Campus Nord ermöglicht den Studierenden einen Einblick in einen industrienahen Anlagenkomplex.

Die Vorlesung "Organisch-chemische Prozesskunde" im Bachelor-Studiengang sowie diverse Praktika und Exkursionen für die Studienrichtungen Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen ergänzen das Lehrangebot des EBI ceb. In Kooperation mit EBI vbt ist EBI ceb verantwortlich für die Vorlesung "Energieverfahrenstechnik" und das Profilfach "Energie- und Umwelttechnik" für den Bachelor-Studiengang.

Es werden aber nicht nur ingenieurwissenschaftliche Fächer gelehrt, sondern auch überfachliche Qualifikationen, wie z. B. "Ethik und Stoffkreisläufe", wo grundlegende Kenntnisse der Ethik und wichtige Stoffkreisläufe auf der Erde und ihre Beeinflussung durch die Gesellschaft den Studierenden im Bachelorstudium vermittelt werden.

EBI ceb ist auch im Rahmen der HECTOR School an einem englischsprachigen Studiengang zur Weiterbildung von Ingenieuren mit Industrieerfahrung beteiligt.

1.2 wichtige Ereignisse in 2022

Hannover Messe im Mai 2022

Auf der Hannover Messe präsentierte das KIT, vertreten durch Forschende des EBI, des Instituts für Technische Chemie (ITC) und des Instituts für Katalyseforschung und -technologie (IKFT), seine innovative Forschungs- und Entwicklungsplattform zum Kohlenstoffkreislauf der Zukunft, das CarbonCycleLab (CCLab). Im CarbonCycleLab wird die komplette Prozesskette des Kohlenstoffkreislaufs der Zukunft, von Rest- und Abfallstoffen bis zu daraus gewonnenen chemischen Grundstoffen für die Wieder-

verwendung in der Chemieindustrie als Ersatz für fossile Rohstoffe abgebildet. Damit trägt das CarbonCycleLab dazu bei, die Energiewende mit einer Kreislaufwirtschaft zusammenzuführen, um zukünftig zu einer ressourceneffizienten, klimaneutralen und wettbewerbsfähigen Wirtschaft zu finden. Das CCLab liefert wichtige Erkenntnisse darüber, wie sich diese Prozessketten in den industriellen Maßstab überführen lassen. Am Messestand war hierzu ein Modell eines für verschiedene Anwendungen geeigneten Flugstromvergasers zu sehen und ein interaktiver Medientisch diente zur anschaulichen 3D-Darstellung des Anlagenverbunds am KIT Campus Nord.

KIT Summer School

KIT-Partnerhochschulen im Ausland organisieren häufig in der vorlesungsfreien Zeit im Sommer sogenannte Summer Schools. Diese ein- oder mehrwöchigen Veranstaltungen bieten Studierenden eine gute Möglichkeit, kurzfristig Auslandserfahrungen zu sammeln und ihren Horizont auch außerhalb des Studienschwerpunktes zu erweitern. Häufig werden die Seminare und Vorlesungen durch ein buntes Rahmenprogramm mit Kurztrips sowie kulturellen und sozialen Veranstaltungen ergänzt.

Im Rahmen des EU-Projekts "Waste to Hydrogen – W2H2" kamen Studierende des Instituto Politécnico Portalegre, Portugal, der KTH Stockholm, Schweden und der ENEA, Italien Ende September 2022 am KIT zu einer Summer School zum Thema Vergasung von Reststoffen und Analysenmethoden von Synthesegas zusammen.

EBI ceb Wandertag und Sommerfest, Weihnachtsmarkt

Nach langer Zeit konnten EBI ceb und DVGW gt in 2022 endlich wieder in Präsenz zusammenkommen. Am 26. Juli traf man sich morgens in Ettlingen, um von dort aus durch den Oberwald nach Karlsruhe zum Institut zurückzuwandern. Dort schloss sich ein Sommerfest bis in den Abend hinein an. An selber Stelle wurde vor Weihnachten ein gemütlicher Weihnachtsmarkt im Freien organisiert. Es waren beides sehr gelungene und alle Mitarbeiter motivierende Veranstaltungen.

ARTE-Filmteam bei Versuchskampagne am Energy Lab

Durch den erfreulicherweise kontinuierlich wachsenden Anteil regenerativ erzeugter elektrischer Energie an unserer Stromversorgung wird leider auch das Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch zu einer Herausforderung für die Netzstabilität. Da Fluktuationen bei der Erzeugung von regenerativem Strom auf Grund natürlicher Einflüsse wie beispielsweise Tag-Nacht-Rhythmus oder Wind-Sturm-Flaute-Phasen unvermeidbar sind, wächst der Bedarf an neuen Speichertechnologien zur Gewährleistung einer kontinuierlichen und sicheren Energieund Stromversorgung. In der ARTE-Dokumentation "Superspeicher – Power auf Dauer?" werden neueste Entwicklungen und Lösungsansätze gezeigt und dabei auch die EBI ceb Dreiphasen-Methanisierung am KIT Energy Lab 2.0 vorgestellt. Über zwei Tage begleitete ein ARTE-Filmteam eine Versuchskampagne am Energy Lab und filmte Versuchsstände am EBI ceb (Bild 1.1).



Bild 1.1: Raphael Küchlin und Siegfried Bajohr erklären einem ARTE-Filmteam das Prinzip der Dreiphasen-Methanisierung (Arte Doku "Superspeicher – Power auf Dauer?"; verfügbar in der Arte Mediathek bzw. unter: https://www.arte.tv/de/videos/104830-000-A/ superspeicher/).

1.3 Forschungsprojekte im Jahr 2022

Auch im Jahr 2022 wurden am EBI ceb und im Bereich Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle wichtige Forschungsprojekte aus dem Umfeld der Energiewende und der Gaswirtschaft durchgeführt. Besonders hervorzuheben sind dabei folgende Projekte:

- 1. H₂-Leitprojekt TransHyDE (BMBF): In dem aus neun Verbünden bestehenden Projekt mit 85 Partnern und einer Gesamtförderung von ca. 140 Mio. € werden verschiedene Transportoptionen für Wasserstoff und dessen Derivate untersucht. In dem von DVGW gt koordinierten Verbund GET H₂ TransHyDE, in dem es um den leitungsgebundenen H₂-Transport geht, wurden 2022 vorbereitende Arbeiten für den Aufbau eines Testloops am RWE-Standort in Lingen durchgeführt. DVGW gt führt Untersuchungen zur Gasbeschaffenheit durch und bearbeitet im Verbundprojekt TransHyDE – Sys" systemische Fragestellungen zur Gasinfrastruktur und zur Bereitstellung von PtX-Produkten.
- 2. H₂-Leitprojekt H2Mare (BMBF): 2022 wurde das BMBF-Leitprojekt zur Offshore-Produktion von Wasserstoff und PtX-Produkten fortgesetzt. Dieses besteht aus vier Verbundprojekten mit 32 Partnern und einem Fördervolumen von ca. 105 Mio. €. EBI ceb und DVGW gt untersuchen gemeinsam die Offshore-Erzeugung von Liquefied Natural Gas (LNG) auf Basis der am Institut entwickelten Waben-Methanisierung und sind außerdem in verschiedene systemische Arbeiten eingebunden. 2022 stand im Zeichen der Planungen zum Umbau der Pilotanlagen im Energy Lab 2.0.
- 3. ENSURE II (BMBF): Das Kopernikus-Projekt "ENSURE" zu neuen Netzstrukturen wurde 2022 erfolgreich fortgeführt. DVGW gt

hat zusammen mit externen Projektpartnern ein Konzept zur sektorengekoppelten Verschaltung von Energieanlagen und -infrastrukturen entwickelt.

- 4. <u>InnoSyn (BMBF)</u>: Das Projekt "InnoSyn (Innovative Synthesen flüssiger Energieträger in lastflexiblen Blasensäulen)" hat Anfang 2021 begonnen mit dem Ziel, die Blasensäule weiter zu entwickeln. DVGW gt beschäftigt sich mit der Fluiddynamik, die Gruppe von Prof. Rauch mit der direkten CO₂-Fischer-Tropsch-Synthese und die Gruppe von Dr. Bajohr mit der Prozessintensivierung der Dreiphasen-Methanisierung durch den Einsatz wasserstofffreisetzender Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC).
- 5. REF4FU (BMDV): Im vom IKFT koordinierten Vorhaben "Erneuerbare Kraftstoffe aus Grünen Raffinerien der Zukunft" mit 10 Mio. € Projektvolumen (KIT-Anteil: 3,4 Mio. € arbeiten elf Projektpartner aus Forschung und Wirtschaft zusammen. Es werden Szenarien bewertet, wie Raffinerien aussehen, die komplett auf erneuerbaren Rohstoffen basieren. Ausgangspunkt sind die auf mittlere und lange Sicht nachhaltig verfügbaren Zwischenprodukte Methanol, Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe, Pyrolyseöle und Wasserstoff.

1.4 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 2022

Im Jahr 2022 wurde trotz der Einschränkungen durch Corona eine große Zahl studentischer Abschlussarbeiten am EBI ceb durchgeführt.

Dissertationen

Die folgenden Doktoranden konnten im Jahr 2022 erfolgreich promovieren:

- Dominik Schollenberger zum Thema: "Anwendung von Wabenreaktoren für die Methanisierung bei Power-to-Gas-Prozessen", Prof. Kolb
- Florian Nestler zum Thema: "Dynamic Operation of Power-to-X Processes Demonstrated by Methanol Synthesis", Prof. Kolb
- Felix Ortloff zum Thema: "Separation of CO₂ from Biogas using Ionic Liquids – Development of an adiabatic chemical absorption process", Prof. Kolb

Masterarbeiten

Die folgenden Studierenden haben im Jahr 2022 am EBI ceb erfolgreich ihre Masterarbeit abgeschlossen:

- Bartholomäus Jan Rebmann: "Prozessentwicklung und reaktionskinetische Untersuchungen für flüssige organische Wasserstoffträger", Prof. Kolb
- Vincent Walter: "Untersuchungen zur Bildung von Feststoffrückstand bei der Umsetzung von biogenem Pyrolyseöl unter inerter Atmosphäre", Prof. Kolb
- Victor Zaghini Francesconi: "Bestimmung des chemischen Gleichgewichts und der Reaktionskinetik der Dreiphasen-Methanisierung in einem Autoklavreaktor", Prof. Kolb

- Arvind Menon: "Development of machine learning models for the evaluation of sector coupling strategies in decentralized energy hubs with Power to Gas plants", Prof. Kolb
- Lukas Springmann: "Untersuchungen zum dominierenden Reaktionsmechanismus der Vergasung biogener Festbrennstoffe mit H₂O und CO₂ bei erhöhtem Druck", Prof. Kolb
- Benedikt von Lewinski: "Untersuchungen zur Pyrolyse von Erdgas in einem Laborreaktor – Einfluss der Prozessparameter und der Eduktgas-Zusammensetzung", Prof. Kolb
- Johannes Waßmuth: "Integration of Mineral Oil Refineries into the Energy Transition: Experimental Study on the Potential of Co-Hydroprocessing a Biomass-Derived Heavy Gasoline", Prof. Rauch

Bachelorarbeiten

Die folgenden Studierenden haben im Jahr 2022 am EBI ceb erfolgreich ihre Bachelorarbeit abgeschlossen:

- Julian Mattusch: "Rekonstruktion der Siedelinie von biogenem Pyrolyseöl mit Hilfe ausgewählter Modellsubstanzen",
 Prof. Kolb
- Christian Michel: "Modellierung und Simulation von Stoffeigenschaften mit Hilfe von Gruppenbeitragsmethoden", Prof. Kolh
- Victoria Harsch: "Modellierung und Simulation des instationären Fließverhaltens einer Schlackeschicht", Prof. Kolb
- Paul Moog: "Inbetriebnahme eines differentiellen Festbettreaktors zur Untersuchung der Reaktionsgeschwindigkeit von Festbrennstoffen unter erhöhtem Druck, Prof. Kolb
- Zeynep Sari: "Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines Kunststoffrecyclingprozesses zur Schmiermittelproduktion", Prof. Rauch

1.5 Laufende wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 20221.5.1 Arbeitsgruppe "Thermo-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung"

Thomas Kolb, Fabian Hüsing, Stella Walker

Die Abteilung Vergasungstechnologie am Institut für Technische Chemie, ITC vgt am Campus Nord (CN) des KIT befasst sich im Rahmen des Helmholtz-Programms "Material and Technologies for the Energy Transition" (MTET) mit Forschungsthemen zur Flugstromvergasung. Das EBI ceb begleitet diese anwendungsbezogenen Arbeiten an Technikums- und Pilotanlagen mit der Forschungstätigkeit zur Brennstoffcharakterisierung fester und flüssiger Brennstoffe und den bei der thermochemischen Konversion gebildeten Produkten. Der Fokus liegt auf den Grundlagen der Vergasung von Festbrennstoffen und der Umsetzung biogener Pyrolyseöle.

Thermochemische Umsetzung von biogenem Pyrolyseöl

Im Rahmen seiner Promotion befasst sich Herr M.Sc. Fabian Hüsing mit der thermochemischen Konversion von biogenen Pyrolyseöltropfen in einer heißen Gasatmosphäre. Dieser Teilprozess steht am Anfang der Prozesskette bei der Umsetzung von biogenen Suspensionsbrennstoffen in einem Flugstromvergaser.

Während der Verdunstung des Mehrkomponentengemischs kann es zur Ausbildung eines festen Produkts durch Polykondensation und Polymerisation von schwersiedenden Brennstoffbestandteilen kommen, einer sogenannten Cenosphäre.

Für die modelltechnische Beschreibung des Umsatzverlaufs bei der Bildung von Cenosphären muss der technische Brennstoff durch einen Modellbrennstoff mit bekannter Zusammensetzung nachgebildet werden. Das Pyrolyseöl konnte mittels Vakuumdestillation in einen verdampfbaren Anteil und einen nicht verdampfbaren Rückstand getrennt werden. Diese Aufteilung des technischen Brennstoffs ermöglicht es, die parallel ablaufenden Prozesse der Verdunstung leichtsiedender Komponenten und der thermochemischen Konversion schwersiedender Stoffe in einer modelltechnischen Beschreibung getrennt voneinander zu betrachten und auch den Einfluss der anteilsmäßigen Verteilung der beiden Stoffklassen im Brennstoff auf die Bildung von Cenosphären zu untersuchen.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden somit zwei Stoffsysteme gewählt, die als Ersatz für den technischen Brennstoff dienen. Als einfachster Modellbrennstoff wurde ein Zweikomponentensystem aus Monoethylenglykol (MEG) und Kraftlignin (LIG) genutzt. Zusätzlich wurde ein Gemisch aus sieben verdampfbaren Komponenten zusammengestellt. Dieses soll die Siedelinie des Pyrolyseöls und somit das Verdunstungsverhalten des technischen Brennstoffs nachbilden.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen am Hochtemperatur-Fallrohrofen VERA wurden die Modellbrennstoffe den technischen Pyrolyseölen gegenübergestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Modellbrennstoffe eine vergleichbare Morphologie ausbilden und somit für die wissenschaftlichen Fragestellungen als Substitute herangezogen werden können (Bild 1.2)

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden für den Modellbrennstoff MEG-LIG der Einfluss der Prozessparameter (Temperatur, Tropfengröße und Verweilzeit in Ofen) sowie die Brennstoffzusammensetzung auf die Morphologie der Cenosphären untersucht. Die Versuchsreihen wurden für den Modellbrennstoff für zwei Brennstoffzusammensetzungen über den Temperaturbereich von 500 °C bis 1600 °C und bei Verweilzeiten zwischen 200 ms und 1000 ms bei Tropfengrößen zwischen 200 µm und 450 µm durchgeführt. Die Produktkonsistenz variierte in Abhängigkeit der Prozessparameter von flüssig über hochviskose Partikel bis zur festen Cenosphäre (**Bild 1.3**).

Mit den Erkenntnissen aus den Arbeiten zur Charakterisierung des biogenen Brennstoffes, der Ausgestaltung eines Modellbrennstoffs sowie der experimentellen Untersuchungen am Hochtemperatur-Fallrohrofen VERA wurde ein Modellansatz entwickelt, der neben den Prozessparameter auch den Einfluss der Brennstoffzusammensetzung bei der Bildung von Cenosphären berücksichtigt.

Kinetik der Feststoffvergasung von biogenem Koks

Frau M.Sc. Stella Walker untersucht im Rahmen ihrer Promotion die Reaktionskinetik der Feststoffvergasung. Bei Einsatz biogener Suspensionsbrennstoffe im Flugstromvergaser durchlaufen bereits im Einsatzstoff enthaltene Koks-Partikel eine zweite Pyrolyse, die Sekundärpyrolyse. Zur Modellierung der Kinetik der Sekundärpyrolyse wurden thermogravimetrische Experimente mit Buchenholzkoks, der auch in der Pilotanlage am Campus Nord zum Einsatz kommt, durchgeführt. Der Holzkoks wurde bei unterschiedlichen Heizraten und Umgebungsdruck in Stickstoff-Atmosphäre pyrolysiert. Komplementär zu den so gewonnenen Daten wurden im Rahmen der Dissertation von Herrn Christoph Schneider durchgeführte Pyrolyseexperimente mit

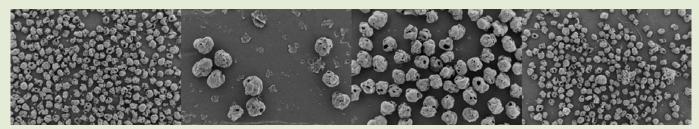


Bild 1.2: REM-Aufnahmen von Cenosphären der unterschiedlichen Modellbrennstoffe (v.l.n.r: Pyrolyseöl; Mehrkomponentengemisch + Lignin; MEG-LIG 35 Ma.-%; MEG-LIG 20 Ma.-%) im Hochtemperatur-Fallrohrreaktor bei 1.000 °C und einer Verweilzeit von 600 ms. Cenosphären besitzen einen Äquivalenzdurchmesser zwischen 180 und 320 μm.

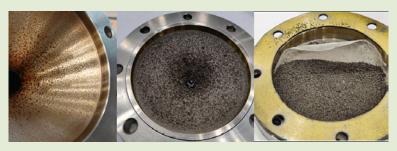


Bild 1.3: Produkt am Auslass des Hochtemperatur-Fallrohrreaktors VERA (v.l.n.r. flüssig, hochviskos, fest).

demselben Brennstoff im Fallrohr-Reaktor (VERA) von der Arbeitsgruppe Modellierung des ITC vgt neu ausgewertet.

Die Sekundärkokse werden in der Flugstromvergasung in den heterogenen Vergasungsreaktionen mit Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf zu Synthesegas umgesetzt. Zur Beschreibung der Abhängigkeit der Umsatzrate des Feststoffes von Temperatur und Reaktionsgaspartialdrücken wurde der am Engler-Bunte-Institut entwickelte Festbettreaktor (Einzelpartikel-Druckreaktor, pSPR) umgebaut. Es können nun Experimente bei bis zu 12,5 bar Wasserdampfpartialdruck und 20 bar Gesamtdruck in Einzelgas-Atmosphäre und im Gemisch mit CO₂ durchgeführt werden (Bild 1.4).

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des pSPR wurden im Rahmen einer Masterarbeit Buchenholz-stämmige Sekundärkokse hinsichtlich ihres Vergasungsverhaltens bei hohen Wasserdampfpartialdrücken untersucht. Bei den Brennstoffen handelt es sich um unterschiedliche Koks-Typen, die während der bereits erwähnten Sekundärpyrolyse im Fallrohr-Reaktor bei unterschiedlichen Aufheizraten hergestellt wurden. In vorhergehenden Arbeiten wurden diese umfangreich charakterisiert und hinsichtlich ihres Umsatzverhaltens bei hohen CO₂-Partialdrücken bis 20 bar und niedrigen Wasserdampfpartialdrücken bis 5 bar untersucht. Die Auswertung der Experimente bei hohem Wasserdampfpartialdruck ergab, dass die Temperaturund Partialdruckabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von Koks-Typ P1400 mittels Potenzansatz beschreibbar ist. Dies weist darauf hin, dass im untersuchten Partialdruckbereich keine Sättigung der reaktiven Oberfläche für diesen Koks-Typ aufgetreten ist (Bild 1.5).

Im Gegensatz dazu konnte für Koks-Typ P1600 oberhalb von 7,5 bar Wasserdampfpartialdruck keine merkliche Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit mit zunehmendem Partialdruck festgestellt werden. Entgegen den Erwartungen war trotzdem die Beschreibung mittels Potenzansatz geeigneter als die Beschreibung mittels Langmuir-Hinshelwood-Ansatz. Die beobachtete Sättigung ist auf eine geringere Anzahl an reaktiven Zentren auf der Koks-Oberfläche für Koks-Typ P1600 verglichen mit Koks-Typ P1400 zurückzuführen. Dies resultiert vermutlich aus der geringeren spezifischeren Oberfläche und gleichzeitig einem höheren Graphitisierungsgrad der Kohlenstoff-Matrix.

An die Experimente bei hohen Wasserdampf-Partialdrücken schließen sich Experimente im Gemisch aus Wasserdampf und CO₂ an. Für die Beschreibung des Vergasungsverhaltens in Gemischt-Atmosphäre von zentraler Bedeutung ist hierbei die Frage, ob Wasserdampf und CO₂ an denselben oder unterschiedlichen aktiven Zentren auf der Koksoberfläche reagieren. Während ersteres mit zunehmenden Partialdrücken zu Konkurrenz um diese Zentren führt, kann im zweiten Fall die Reaktionsgeschwindigkeit im Gemisch stets durch die Summe der Reaktionsgeschwindigkeiten in Einzel-Atmosphäre beschrieben werden. Erste Versuche weisen bereits darauf hin, dass für den Koks-Typ mit geringerer spezifischer Oberfläche, höherer Graphitisierung und höherer Dispersion an katalytisch aktivem Calcium (P1600) im untersuchbaren Druckbereich kompetitives Verhalten von Wasserdampf- und CO₂-Molekülen um reaktive Zentren auf der Koksoberfläche beobachtet werden kann. Ungeklärt ist hier noch, welche Rolle die hohe Calcium-Dispersion spielt. Bei Experimenten in CO₂-Atmosphäre konnte ein starker katalytischer Einfluss von Calcium beobachtet werden. Diese katalytische



Bild 1.4: Der Einzelpartikel-Druckreaktor (pSPR).

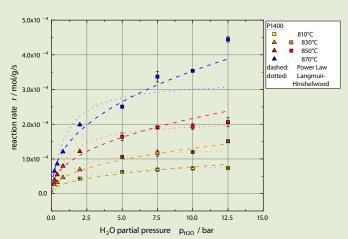


Bild 1.5: Experimentell im pSPR bestimmte und mittels Uniform-Reaction-Modell angepasste Reaktionsgeschwindigkeiten der Vergasung von Koks-Typ P1400 bei unterschiedlichen Wasserdampf-Partialdrücken sowie angepasste Modelle zur Beschreibung der Reaktionskinetik (Potenzansatz und Langmuir-Hinshelwood-Ansatz).



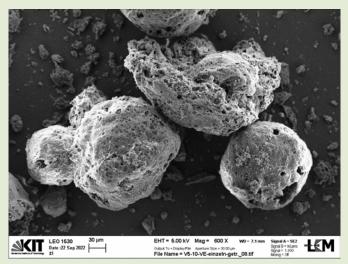


Bild 1.6: Links: Cenosphären, die während eines Experiments mit 10 Ma.-% Holzkoks in Pyrolyseöl bei einer Temperatur von ca. 1.100 °C im bioliq®-Vergaser gebildet wurden. Zu erkennen sind eingelagerte Holzkokspartikel. Rechts: Cenosphären, die bei einem entsprechenden Versuch mit reinem Pyrolyseöl gebildet wurden.

Wirkung scheint im Gemisch mit Wasserdampf jedoch auszubleiben.

Anhand von Buchenholzkoks wurden somit umfangreiche Erkenntnisse zum Pyrolyse- und Vergasungsverhalten in $\rm CO_2$ bzw. Wasserdampf erlangt.

Weitgehend unbekannt hinsichtlich ihres Vergasungsverhaltens sind die im Flugstromvergaser durch Cracken und Polymerisation aus Pyrolyseöl bzw. Pyrolyseöl-Holzkoks-Gemischen entstandenen Cenosphären. 2022 wurden in der Frühjahrskampagne am bioliq®-Flugstromreaktor Versuche durchgeführt, um Feststoffproben zu gewinnen. Sowohl bei Versuchen mit reinem Pyrolyseöl als auch bei Versuchen mit einem Pyrolyseöl-Holzkoks-Gemisch konnten Feststoffproben entnommen werden. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der Proben zeigten, dass beide Proben Cenosphären unterschiedlichster Partikelgröße enthalten. Analysen der Partikelgrößen bestätigten, dass Cenosphären mit einem Flächenäquivalenzdurchmesser von unter 100 µm bis zu 1000 µm vorliegen. Die Cenosphären, die während der Experimente mit einem Pyrolyseöl-Holzkoks-Gemisch entstanden, weisen teilweise Holzkoks-Partikel eingelagert in die neu gebildete Feststoff-Matrix auf (Bild 1.6).

1.5.2 Arbeitsgruppe "Katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung"

Siegfried Bajohr, Rafael Becka, Crispin Deppe, Mathias Held, Brahim Jouini, Martin Kansy, Benedikt von Lewinski, Simon Sauerschell

Methanisierung im Dreiphasen-Reaktor

Die EBI ceb Pilotanlage zur Dreiphasen-Methanisierung (3PM) wurde auch in 2022 in mehreren Messkampagnen im Rahmen verschiedener öffentlich geförderter Projekte erfolg-

reich betrieben. Die Pilotanlage hat eine Methan-Nennleistung von 100 kW und ist Teil des Reallabors "Energy Lab 2.0" (www.elab2.kit.edu) am KIT Campus Nord, in welchem die intelligente Verknüpfung verschiedener Energieerzeugungs-, Speicher- und Bereitstellungsmöglichkeiten im Pilotmaßstab erforscht wird. Die 3PM-Anlage des EBI ceb nutzt hierzu eine neuartige Technologie, mit der aus grünem Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid Methan erzeugt wird. Da Methan uneingeschränkt ins Erdgasnetz eingespeist werden kann und auch die Verflüssigung zu LNG technisch und energetisch deutlich einfacher zu bewerkstelligen ist als die Wasserstoff-Verflüssigung, eignet es sich besonders gut zur Speicherung, zum Transport und zur Bereitstellung von großen Energiemengen. Hinzu kommt die Bedeutung von Methan als wichtigem Rohstoff für die stoffliche Nutzung beispielsweise für die Erzeugung von Kunststoffen oder anderen Produkten oder Basischemikalien der chemischen Industrie.

Das Herzstück der KIT Dreiphasen-Methanisierungsanlage ist ein Blasensäulenreaktor, in welchem eine Suspension aus feinkörnigem Katalysator und einer inerten Flüssigkeit vorgelegt wird. Die über einen Gasverteiler in die Suspension einströmenden Gase Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff werden an der Oberfläche des Katalysators zu Methan und Wasserdampf umgesetzt. Das Reaktorkonzept zeichnet sich insbesondere durch seine Robustheit bei dynamischem bzw. lastflexiblem Betrieb aus, da durch die gute Durchmischung, die hervorragende Wärmeübertragung und die hohe Wärmekapazität der Flüssigphase eine exzellente Temperaturkontrolle bei der Methanisierung möglich ist. Dies ermöglicht der 3PM eine von anderen Methanisierungsverfahren unerreichbare Dynamikfähigkeit, welche insbesondere bei der direkten Kopplung an fluktuierend anfallenden regenerativen Energieströmen Vorteile bietet.

Die Dynamikfähigkeit der 3PM wurde im Rahmen des BMWK-Projektes "RegEnZell: Zellenübergreifende Regionalisierung der Energieversorgung durch betriebsoptimierte Sektorenkopplung" detailliert untersucht. In 2022 wurden hierfür verschiedene repräsentative Lastprofile mit der 3PM-Pilotanlage nachgefahren. Hierzu wurden die Lastprofile in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern festgelegt, wobei hierfür Stromprofile, welche an einem realen Umspannwerk aufgezeichnet wurden und einen hohen Anteil an Wind- und PV-Strom aufwiesen, als Basis Verwendung fanden. Bei der Festlegung der Versuchsparameter für die 3PM wurde vereinfachend angenommen, dass die Stromprofile über eine angeschlossene Wasserelektrolyse direkt in Wasserstoff-Bereitstellungsprofile überführt werden können. Der Leistungsbereich wurde zudem auf die max. Leistung der 3PM (100 kW Methan) umgerechnet. Exemplarische Versuchsergebnisse für ein solchermaßen simuliertes dynamisches Lastprofil zeigt Bild 1.7. Das Mischungsverhältnis im Einsatzgas der 3PM wurde dabei konstant gehalten, während der insgesamt zugeführte Volumenstrom im Bereich von 15-100 % der Nennlast variiert wurde, um die dynamischen Lastwechsel zu simulieren. Die Volumenströme wurden bei den Lastwechseln innerhalb von etwa 30 s auf den jeweils neuen Wert angepasst, was im realen Betrieb einer sprungartigen Änderung des Betriebspunkts nahekommt und die Grenzen der Machbarkeit einer technisch relevanten Regelung darstellt. Aufgrund der hohen Dynamikfähigkeit der 3PM weicht selbst unter diesen "worst case" Bedingungen die Reaktortemperatur nach den Lastwechseln nur kurzzeitig um max. 10 K vom Sollwert 320 °C ab, während mit etablierten Reaktorkonzepten bei einem solchen Lastsprung das thermische Durchgehen des Reaktors nahezu unvermeidbar gewesen wäre.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt zur 3PM war in 2022 die systematische Untersuchung des Aktivierungsprozesses des Katalysators. Eigentlich muss der für die Methanisierung benötigte Nickel-Katalysator vor einer Versuchskampagne in einer getrennten Vorrichtung mit Wasserstoff und unter genau definierten Herstellerangaben aktiviert werden. Bisher erfolgte danach die Überführung des Katalysators in den Blasensäulenreaktor, wobei dieser Schritt auf Grund der pyrophoren Eigenschaften des Katalysators unter Sauerstoffausschluss und mit Hilfe eines komplexen Schleusensystems erfolgen musste. In ersten Versuchen konnte nun gezeigt werden, dass die Aktivierung des Katalysators entgegen der Herstellerempfehlung und eigener Erwartungen auch im suspendierten Zustand direkt im Blasensäulenreaktor der 3PM möglich ist. Zur detaillierten Untersuchung der Reduktionsreaktion wurden begleitende Versuche im Labor durchgeführt, in denen die Reduktion im zweiphasigen System außerhalb der 3PM direkt mit der in-situ Reduktion in der 3PM verglichen wurde. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine ausreichend hohe Reduktion und Aktivierung des Katalysators direkt in der Flüssigphase möglich ist, was den Aktivierungsprozess deutlich vereinfacht. In 2023 werden diese vielversprechenden Ergebnisse aus dem Labor und der Pilotanlage weiter systematisch untersucht, wissenschaftlich belegbar beschrieben und damit Reduktions- und Aktivierungsmethoden zur weiteren Prozessoptimierung entwickelt.

Die Arbeiten zum BMBF-Projekt "InnoSyn: Innovative Syntheseprozesse zur Erzeugung chemischer Energieträger aus grünem Wasserstoff in lastflexiblen Blasensäulenreaktoren", über das bereits 2021 berichtet wurde, wurden in 2022 mit dem Schwerpunkt der Untersuchung der Hydrierung des als Flüssigphase in der 3PM genutzten Dibenzyltoluols (DBT: C₂₁H₂₀) fortgesetzt. Die Hydrierung findet unter den Bedingungen der Dreiphasen-Methanisierung als Nebenreaktion statt und wurde in der Vergangenheit bereits im Rahmen der möglichen Verwendung von DBT als Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) an den verschiedensten Forschungseinrichtungen intensiv untersucht. Die Arbeiten am EBI ceb zielen auf die modellmäßige Beschreibung der parallel ablaufenden Hydrierung und Methanisierung und die Ausnutzung der Wechselwirkung beider Reaktionen zur weiteren Verbesserung der 3PM durch die Möglichkeit, Wasserstoff innerhalb des Reaktors in Form von teilhydriertem DBT speichern und bedarfsgerecht zur Verfügung stellen zu können ab. Am Projektende von "InnoSyn" soll ein Verfahren zur Transfermethanisierung stehen, für welches in 2022 mit dem Aufbau einer Laborapparatur für den experimentellen Machbarkeitsnachweis begonnen wurde.

In einem weiteren "InnoSyn"-Arbeitspaket wird die Löslichkeit der an der Methanisierung beteiligten Edukt- und Produktgase in DBT und seinen (teil-)hydrierten Derivaten untersucht. Die Löslichkeit der Gasphase in der Flüssigphase bestimmt maßgeblich den Stofftransportwiderstand und somit den erreichbaren Umsatz im Blasensäulenreaktor und ist für die Beschreibung der Transfer-Methanisierung essenziell. Zur Bestimmung der Löslichkeiten wurde daher eine Laborapparatur angeschafft, welche in Bild 1.8 zu sehen ist und mit deren Hilfe die notwendigen Stoffdaten ermittelt werden können. Bei dieser Apparatur handelt es sich um einen Prototyp, der in Zusammenarbeit mit einem renommierten Hersteller von Laborapparaturen entwickelt wurde, da es keine standardisierten Messapparaturen zur Bestimmung von Gaslöslichkeiten bei hohen Drücken und Temperaturen gibt.

Methanisierung im Waben-Reaktor

Die Arbeiten zu dem in 2021 gestarteten und vom BMBF geförderten Projekt "H2Mare" wurden in 2022 intensiv vorangetrieben. Für die im Projekt vorgesehene Weiterentwicklung der Waben-Methanisierung, die bereits 2019 im EU Projekt STO-RE&GO im brandenburgischen Falkenhagen erfolgreich in den 1 MW Maßstab überführt werden konnte, wurde die vorhandene EBI ceb Labor-Wabenanlage um eine hochauflösende faseroptische Temperaturmessung erweitert. Diese kann orts- und zeitaufgelöst die Temperaturverteilung im Reaktor erfassen und ermöglicht so sehr detaillierte Aussagen über die Wärmeentwicklung innerhalb der mit Katalysator beschichteten Waben. Durch die gleichzeitige Mehrfachnutzung von bis zu vier Temperaturmessfühlern ist auch die Aufnahme radialer Temperaturprofile möglich. In Vorarbeiten zur Temperaturmessung wurde zunächst der Temperaturbereich von 50 bis 550 °C, in welchem

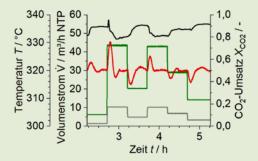


Bild 1.7: Dynamischer Betrieb der 3PM in 30 min. Intervallen. Rot: Temperatur im Blasensäulenreaktor, grau: CO₂-Volumenstrom, grün: H₂-Volumenstrom, schwarz: CO₂-Umsatz.



Bild 1.8: Sorptionsapparatur zur Bestimmung der Gaslöslichkeiten der an der Dreiphasen-Methanisierung beteiligten Edukt- und Produktgase.

die katalytische Methanisierung typischerweise laufen wird, kalibriert. Die anschließenden Auswertungen zeigen, dass sich im Temperaturbereich unter 200 °C ein linearer Zusammenhang zwischen Messsignal und tatsächlicher Temperatur einstellt, jedoch bei Temperaturen von über 200 °C eine Anpassung mit einem Polynom vierter Ordnung präzisere Ergebnisse liefert. Durch eine in MATLAB generierte Auswerteroutine können die bei bis zu 40 Hz aufgenommenen Datenpunkte gemittelt werden, was eine deutliche Verringerung der Messdatenstreuung und gleichzeitig eine Reduktion der notwendigen Speicherkapazität zulässt. Um einen Praxistest unter realen Methanisierungsbedingungen durchzuführen, wurde mit dem Messaufbau die Methanisierung in einer verdünnte Nickel-Katalysator-Schüttung untersucht. Das folgende Bild 1.9 zeigt die Entwicklung des Temperaturprofils in der Schüttung während der ersten 10 Minuten des Versuchs. Die gut sichtbar ansteigende Temperatur als Funktion der Zeit, sowie deren detaillierte lokale Auflösung belegen die Fähigkeit des Messaufbaus, Temperatur-Effekte durch schnelle Lastwechsel oder Desaktivierungsphänomene präzise zu erfassen.

Aufbauend auf diesen vielversprechenden Ergebnissen wurde mit der Weiterentwicklung der katalytisch beschichteten metallischen Waben begonnen und die aktuellen Forschungsarbeiten zielen speziell darauf ab, die hochauflösende Temperaturmessung direkt in die Waben zu integrieren. Auf Basis der mit diesem Versuchsaufbau gewonnen experimentellen Daten können anschließend die Waben weiter optimiert und für den Betrieb der Demoanlage zuverlässig ausgelegt und hochskaliert werden.

Methanolsynthese

Methanol spielt als Basischemikalie eine wichtige Rolle in der chemischen Industrie und wird industriell durch katalytische Hydrierung der Kohlenstoffoxide CO und CO₂ mit H₂ hergestellt. Derzeit werden diese Ausgangsstoffe in der Regel durch Reformierung von Erdgas oder Vergasung von Kohle bereitgestellt mit den bekannten Nachteilen einer auf fossilen Rohstoffen basierenden Technologie. Eine nachhaltige Möglichkeit der Methanolherstellung stellt die Nutzung von CO₂ aus der Luft oder aus nichtfossilen oder unvermeidbaren Punktquellen in Verbindung mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff dar. Reaktionstechnisch führen die hohen CO2-Anteile jedoch zu einigen Herausforderungen in Bezug auf Aktivität und Standzeit der eingesetzten Katalysatoren sowie die im Fall der Nutzung von CO₂ ungünstigen Lage des thermodynamischen Gleichgewichts. Auch geben die gängigen reaktionskinetischen Modelle die Verhältnisse bei der CO2-basierten Methanolsynthese nur bedingt gut wieder und diese sind daher für eine zuverlässige Prozessauslegung und Skalierung von

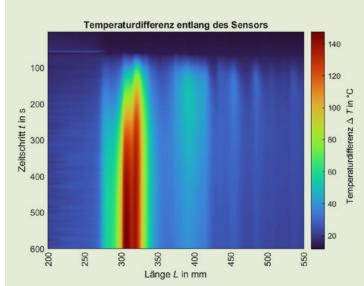


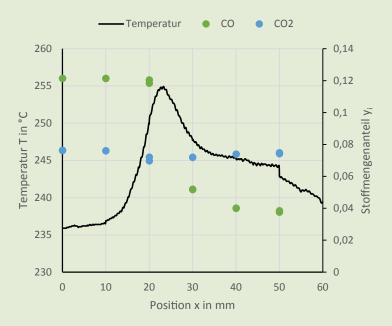
Bild 1.9: Temperaturverteilung als Funktion der Zeit, Methanisierung mit verdünntem Ni-Katalysator.

Laborexperimenten auf einen industriell relevanten Maßstab untauglich.

Reaktionskinetische Modelle beschreiben die zeitliche Änderung der Stoffmengen während einer chemischen Reaktion. Abgeleitet werden diese Modelle in der Regel aus Messung der Änderung der Stoffmengen zwischen Ein- und Ausgang eines Rohrreaktors (Integralreaktor) oder eines ideal durchmischten Reaktors (Differentialreaktor) bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen. Beide Konzepte nähern daher den zeitlichen Verlauf der Reaktion durch Einzelmessungen und Interpolation an. In einem Profilreaktor hingegen kann der zeitliche Verlauf der Reaktion durch ortsaufgelöste Messung der Stoffmengen und der Temperatur ermittelt werden, wodurch das daraus abgeleitete Modell den tatsächlichen Verlauf der Reaktion bei den gegebenen Bedingungen abbildet. Aus diesem Grund wurde im vergangenen Jahr eine neue Versuchsapparatur zur Untersuchung der CO₂-basierten Methanolsynthese angeschafft und in Betrieb genommen. Kernstück der neuen Apparatur ist ein innovativer Profil-Reaktor, in welchem mit Hilfe einer axial durch das Katalysatorbett gehenden dünnen Kapillare während der Reaktion an jeder beliebigen Position Gasproben genommen und diese mittels Gaschromatograph analysiert werden können. Zeitgleich wird die Temperatur an der Stelle der Probennahme gemessen. Da die Versuchsapparatur über je einen Verdampfer für Wasser und Methanol verfügt, können sowohl Einflüsse dieser Produkte auf den Reaktionsverlauf untersucht als auch eine Gasrückführung analog zur industriellen Methanolsynthese experimentell abgebildet werden. Kombiniert mit dem hohen möglichen Betriebsdruck von bis zu 100 bar können so alle aus wissenschaftlicher und industrieller Sicht relevanten Betriebszustände im Labormaßstab am EBI ceb untersucht werden. Nach derzeitigem Kenntnisstand verfügen bisher nur sehr wenige Arbeitsgruppen über diese experimentellen Möglichkeiten. Beispielhaft zeigt Bild 1.10 erste Ergebnisse in Form der Konzentrationsprofile von CO und CO₂, die mit fortschreitender Reaktion zu Methanol abreagieren, zusammen mit dem dazugehörenden Temperaturverlauf. Deutlich zu sehen ist, dass etwa 10 mm nach Eintritt der Eduktgase in den Reaktor die Reaktion startet und es nach ca. 20 mm zu einem ausgeprägten Temperatur-Peak kommt, der durch die exotherme Reaktion des CO zu Methanol entsteht. CO₂ hingegen wird unter den gewählten Versuchsbedingungen nahezu nicht umgesetzt, solange noch CO im Edukt vorhanden ist

Methanpyrolyse

Wasserstoff gilt als einer der wichtigsten Energieträger der Zukunft. Da der erwartet steil ansteigende Bedarf an CO₂-armem Wasserstoff durch die nur langsam wachsende Produktionskapazität an grünem Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse mit regenerativem Strom gedeckt werden kann, müssen andere Technologien zur schnellen Substitution der etablierten Wasserstoffherstellung aus fossilen Quellen gefunden werden. Durch Methanpyroylse erzeugter Wasserstoff wird in der "Farbenlehre" der unterschiedlichen Wasserstofferzeugungstechnologien auch als Türkiser Wasserstoff bezeichnet und bietet die Möglichkeit, trotz der begrenzten Verfügbarkeit regenerativer erzeugter elektrischer Energie und entsprechender Wasserelektrolyse-Kapazitäten einen schnellen Hochlauf der Wasserstofferzeugung und damit eine erhebliche Reduktion der Treibhausgasemissionen innerhalb kurzer Zeit zu erzielen. Dadurch, dass die theoretisch bilanziell CO2-neutrale Erzeugung von Wasserstoff auch aus fossilen Rohstoffen wie Erdgas ermöglicht wird, wird der spezifische Bedarf an regenerativer Energie für die Wasserstofferzeugung signifikant gesenkt. Allerdings müssen bei der Nutzung von fossilem Erdgas auch die bei Erzeugung und Transport anfallenden Vorkettenemissionen berücksichtigt und vergleichend bewertet werden, was u. a. durch die Kollegen der DVGW-Forschungsstelle am EBI erfolgt. Allerdings besteht neben der Nutzung von fossi-



$$p_{abs} = 80 \ bar$$

$$T_{Wand} = 250 \ ^{\circ}C$$

$$SN = \frac{\tilde{y}_{H2} - \tilde{y}_{CO2}}{\tilde{y}_{CO2} + \tilde{y}_{CO}} = 2,1$$

$$COR = \frac{\tilde{y}_{CO2}}{\tilde{y}_{CO2} + \tilde{y}_{CO}} = 0,4$$

Bild 1.10: Exemplarische Temperatur- und Konzentrationsprofile bei der Methanolsynthese.

lem Methan auch die Möglichkeit der Nutzung von Biomethan als Edukt für die Methanpyrolyse, was im Extremfall sogar den Aufbau von H₂-Wertschöpfungsketten mit negativen CO₂-Emissionen ermöglicht und hinsichtlich des CO₂-Senkungspotenzials bewertet werden sollte.

Neben den theoretischen und auf Literaturdaten basierenden Modellbetrachtungen wurde in 2022 am EBI ceb mit der technologischen Bewertung der Methanpyroylse auf Basis eigener Versuchsergebnisse begonnen. U. a. wurde hierzu der Einfluss verschiedener in Erdgasen typischerweise vorkommender Begleitkomponenten auf die Methanpyrolyse untersucht, da die allermeisten Literaturergebnisse mit hochreinem Methan erzielt wurden und nur bedingt auf die Pyrolyse eines realen Erdgases übertragbar sind. Neben den erwarteten Einflüssen von Temperatur und Verweilzeit auf den Methanumsatz wurde festgestellt, dass insbesondere das Vorhandensein von Ethan im Eduktgas die Methanpyrolyse begünstigt. Wie in Bild 1.11 zu sehen ist, steigt der aus der Produktgaszusammensetzung ermittelte Methanumsatz deutlich an, obwohl gemäß Reaktionsgleichung C₂H₆ $+ H_2 \rightarrow 2 CH_4$ bei der Pyrolyse von Ethan als Produkt Methan entsteht und somit der gemessene Methanumsatz zurückgehen müsste. Als Erklärung dienen hierfür die durch das leichter als Methan umsetzbare Ethan eingebrachten zusätzlichen CHx-Radikale, die für eine Beschleunigung der Methanpyrolyse sorgen.

Diese Grundlagenuntersuchungen zur Methanpyroylse und zu deren mechanistischer Beschreibung werden weiter fortgesetzt und entsprechend erweitert. Insbesondere die bei der Pyrolyse neben der Reaktion zu Wasserstoff und Kohlenstoff ablaufenden Aufbaureaktionen zu kurzkettigen Kohlenwasserstoffen bis hin zu (polycyclischen)-aromatischen Kohlenwasserstoffen werden mit Hilfe eines verbesserten Versuchsaufbaus, der sich aktuell in der Planung befindet, untersucht werden.

1.5.3 Arbeitsgruppe "Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung"

Frank Graf, Friedemann Mörs, Tobias Stegmaier

Brennstoffe müssen für die meisten technischen Anwendungen strenge Anforderungen bezüglich Reinheit und Zusammensetzung einhalten. Hierzu sind entsprechend energieeffiziente Prozessstufen nötig, die vor allem den Reinigungs- und Regenerationsaufwand minimieren. Teilweise kann die Brennstoffaufbereitung auch in den eigentlichen Erzeugungs- oder Umwandlungsprozess integriert werden und so eine vorteilhafte Kombination aus Erzeugung/Umwandlung und Aufbereitung ermöglichen. Derzeit werden in der Arbeitsgruppe insbesondere neuartige Konzepte zur Bereitstellung von gasförmigen Brennstoffen aus erneuerbaren Quellen wie Biomethan erforscht und auf ihre Eignung zur Prozessoptimierung etablierter Verfahren oder zur Entwicklung neuer Verfahren hin bewertet. Einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten stellt die Bereitstellung von CO2 aus unterschiedlichen Quellen für PtX-Prozesse dar. Außerdem werden grundlegende Untersuchungen zu Hydrodynamik und Stoffübergang in Dreiphasen-Systemen wie Füllkörperkolonnen oder Blasensäulenreaktoren durchgeführt.

Einfluss der Stoffeigenschaften hochviskoser Flüssigkeiten auf Hydrodynamik und Stoffübergang in Packungs- und Füllkörperkolonnen

In der thermischen Verfahrenstechnik sind Packungskolonnen gängige Apparate zur Intensivierung des Stofftransports in Gas/Flüssigkeits-Systemen, z. B. bei der Absorption. Dabei wird die Packungskolonne in der Regel im Gegenstrom betrieben, wobei das Feedgas im Sumpf der Kolonne eingeführt wird, während die Absorptionsflüssigkeit am Kolonnenkopf über die Packung verteilt wird. Die Flüssigkeit fließt anschließend in Form von Rieselfilmen oder in Gestalt von Tropfen gravitationsbedingt durch

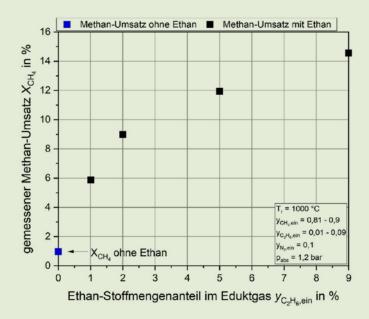


Bild 1.11: Einfluss der Prozessparameter (links) und der Eduktgaszusammensetzung (rechts) auf die Methanpyrolyse.

die Packung herab. Dabei wird sie mit dem aufsteigenden Gasstrom in Kontakt gebracht, wodurch eine Komponente des Feedgases, wie beispielsweise CO₂, selektiv in die Waschflüssigkeit absorbiert. Die Packung sorgt hierbei für eine gleichmäßige Verteilung der Flüssigphase und eine größere effektive Stoffaustauschfläche zwischen Gas und Flüssigkeit, wodurch der Stofftransport bei minimalem Druckverlust verbessert werden kann.

Am Engler-Bunte-Institut wird seit mehreren Jahren ein neuartiges Absorptionsverfahren zur Abtrennung von CO₂ aus unterschiedlichen Gasgemischen entwickelt, welches den Einsatz von chemisch-funktionalisierten ionischen Waschflüssigkeiten (IL) in einem innovativen Aufbereitungskonzept vorsieht. Aufgrund des vernachlässigbaren Dampfdrucks der IL ermöglicht dieses Verfahren gegenüber herkömmlichen Gaswäschen signifikante Energieeinsparungen. Die im Vergleich zu Wasser hohe Viskosität und niedrige Oberflächenspannung von ILs führen jedoch zu Stofftransportlimitierungen bei der Absorption von CO₂. Der Stofftransport zwischen Gas und Flüssigkeit innerhalb der Kolonne ist hierbei hauptsächlich von den vorliegenden Phasenanteilen der Flüssigphase (Film, Rinnsale, Tropfen) und der sich ausbildenden Phasengrenzfläche abhängig. In der Literatur finden sich jedoch hauptsächlich Korrelationen, die Wasser als Modellmedium verwenden. Diese sind somit aufgrund der sich stark unterscheidenden Stoffeigenschaften nicht für ILs zulässig. Um die Hydrodynamik und den Stofftransport mit IL bei der Absorption von CO₂ in ausreichender Güte modellieren zu können, sind somit weitere experimentelle Untersuchungen mit höherviskosen Modellmedien notwendig.

2022 wurde das BMWi-Leitprojekt "MethQuest" erfolgreich abgeschlossen, an dem auch die Arbeitsgruppe "Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung" beteiligt war. Im Projekt wurde die IL-Wäsche erstmals zur Abtrennung von CO₂ aus Umgebungsluft adaptiert (engl. "Direct Air Capture", kurz: DAC). Zur Auslegung und Bewertung dieses Anlagenkonzepts wurde ein 1D-Kolonnenmodell erstellt. Ein Fokus war die Implementierung von passenden Stofftransportkorrelationen für die hochviskose IL. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes eine Anlage nach VDI-Richtlinie 2761 aufgebaut und in Betrieb

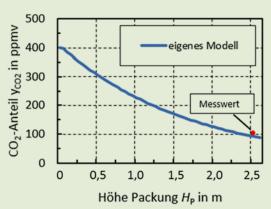


Bild 1.12: Modellierter und gemessener CO₂-Anteil aufgetragen über die Höhe der Packungskolonne.

genommen. Durch das Vermessen von hochviskosen Modellmedien wie Glyzerin-/Wasser-Mischungen konnten Stoffübergangskoeffizienten bestimmt werden, welche zur Erstellung einer gültigen Stofftransportkorrelation dienten.

Mit dieser war es möglich, die DAC-Mini-Plant des DVGW modelltechnisch abzubilden, um die Abscheideeffizienz des Absorbers zu simulieren. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und simulierten Werten für die $\rm CO_2$ -Konzentration im Absorberabgas, wie in **Bild 1.12** zu erkennen ist.

Bei einer Eingangskonzentration von 400 ppmv CO₂ verließ die Luft den Absorber mit einer CO₂-Konzentration von 100 ppmv, was einem Abscheidegrad von knapp 75 % entspricht. Dieser Wert stimmt gut mit dem Ergebnis der Modellierung überein, welche bei den entsprechenden Eingangsbedingungen eine Austrittskonzentration von 87 ppmv CO₂ vorausgesagt hatte. Die Randbedingungen sind in **Bild 1.13** dargestellt.

Untersuchungen zur Hydrodynamik in Blasensäulen

Bzgl. der Untersuchung der Hydrodynamik in Blasensäulen lag der Schwerpunkt der Arbeiten im Bereich der Optimierung/ Umbau der Versuchsanlage und der Integration neuer Messtechnik. Zentraler Bestandteil des Umbaus ist die Anpassungen der Glaskolonne (siehe Bild 1.14 links). Die vier neuen Glaszugänge erlauben den Einbau von optischen Nadelsonden. Der neu entwickelte Gasverteiler ermöglicht eine gleichmäßige Gasvolumenstrom-Verteilung unabhängig von den Betriebsbedingungen und den Stoffeigenschaften. Dies stellt konstante Anfangsbedingungen bei der Blasenbildung sicher und ermögliche eine aussagekräftige Untersuchung der Hydrodynamik. Zudem wurde eine neuartige optische Nadelsonde mit zwei Spitzen in Zusammenarbeit mit dem Hersteller entwickelt. Dabei wurde das Messverfahren, welches für optische Nadelsonden mit einer Spitze bereits am EBI eingesetzt wird, erstmals auf die neue Nadelsonde mit zwei Spitzen übertragen.

Zudem wurde ein Tomograph beschafft. Diese Messtechnik ermöglicht die nicht invasive ortssaufgelöste Messung (auf einer Ebene) des Gasgehalts in der Blasensäule. Auch hier wurde ein neuer inline-Sensor in Austausch mit dem Herstellen designt (siehe Bild 1.14 rechts). Dieser kann in die umgebaute Glasblasensäule eingesetzt werden. Durch die Einführung des Tomographen steht eine weitere Messtechnik zur Bestimmung des Gasgehalts zur Verfügung. Untersuchungen ergaben, dass die Messung des Gasgehalts mithilfe der Nadelsonde beim gleichzeitigen Vorliegen von auf- und abwärtsströmenden Blasen einen systematischen Messfehler ausweist. Mithilfe des Tomographen soll dieser Messfehler näher untersucht werden, um weitere Erkenntnis über die lokale Hydrodynamik zu erhalten.

1.5.4 Arbeitsgruppe "Chemische Konversion Erneuerbarer Energien"

Reinhard Rauch, Wiebke Asbahr, Philipp Graefe, David Graf

Gesellschaftlich stark debattiert wird derzeit der Verkehrs- und Transportsektor. Mit der favorisierten Elektromobilität rücken

Bild 1.13: Kenngrößen der Mini-Plant Anlage als Grundlage zur Validierung des Kolonnenmodells.

Verwendete IL	Temperatur in °C		Höhe Packung in m	Volumenstrom Gas in m³/h	Volumenstrom IL in I/h	Viskosität IL in mPa∙s
10 % [P4444][Pro] in [BDiMIM][BTA]	30	0,2	2,6	10	24	200

neue Technologien zur Dekarbonisierung des Verkehrs in den Fokus. Nichtsdestotrotz besitzt der größte Anteil neu zugelassener Fahrzeuge weiterhin einen Verbrennungsmotor, welcher im Durchschnitt über zehn Jahre im Einsatz ist. Um die ambitionierten Klimaziele der Europäischen Union erreichen zu können, ist es deshalb wichtig, neben der Einführung neuer Technologien ebenfalls Übergangslösungen für eine sich nur langsam ausdünnende Verbrenner-Bestandsflotte zu finden.

Die Arbeitsgruppe forscht an der Weiterentwicklung von Synthesen für die Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen, wie z. B. derzeit der Schwerpunkt auf die direkte Nutzung von CO_2 in der Fischer-Tropsch-Synthese, und dem Upgrading vom Rohprodukt über Hydroprocessing zum fertigen Kraftstoff. Neben der CO_2 -FT-Synthese beschäftigt sich die Arbeitsgruppe seit Ende 2022 zusätzlich mit einem neuen Reaktorkonzept für die sorptionsgestützte FT-Synthese.

Neues Reaktorkonzept für die sorptionsgestützte Fischer-Tropsch-Synthese

Bei der FT-Synthese wird Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) zu Kohlenwasserstoffen (KWs) und Wasser umgesetzt. Durch die in-situ Wasserentfernung können wesentliche Vorteile im Vergleich zu einer nicht-sorptionsgestützten FT-Synthese erzielt werden. Die Anwe-

senheit von H_2O beschleunigt die Deaktivierung des Katalysators. Folglich kann durch das Entfernen von Wasser aus der Reaktionszone die Katalysatorlebenszeit verlängert werden. Zudem setzt sich H_2O an den aktiven Stellen des Katalysators ab und inhibiert dadurch die Reaktion. Das Entfernen von Wasser führt demensprechend zu einer Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit durch höhere Partialdrücke sowie geringere kinetische Inhibierung und steigert letztendlich den Synthesegasumsatz. Im Fall von Fe-basierten Katalysatoren kann zusätzlich zu den zuvor genannten Punkten das Wasser-Gas-Shift-Gleichgewicht verschoben werden. Durch die in-situ Wasserentfernung wird die unerwünschte Reaktion von CO zu CO_2 unterdrückt und die Reverse-Wasser-Gas-Shift (RWGS) Reaktion von CO_2 zu CO, welches dann zu langkettigen KWs weiterreagiert, begünstigt.

Aus dieser Motivation heraus wurde in der Arbeitsgruppe ein neues Reaktorkonzept für die FT-Synthese mit in-situ Wasseradsorption und zusätzlicher -desorption entwickelt (**Bild 1.15**). Das Konzept besteht aus zwei miteinander verbundenen Suspensionsblasensäulen (engl. Slurry-Bubble-Column-Reactor – SBCR). Die Suspension setzt sich aus FT-Produkt, -Katalysator und Wasser-Sorbens zusammen. Eine der SBCR wird mit Edukt-Gas für die FT-Synthese durchströmt. Durch Adsorption wird das bei der FT-Reaktion als Nebenprodukt entstehende Wasser aus dem Produktgemisch entfernt. Das gesättigte Sorbens zirkuliert nach



Bild 1.14: Links: Betrieb der umgebauten Blasensäule mit neu entwickeltem Gasverteiler zur gleichmäßigen Gasvolumenstrom-Verteilung. Rechts: Inline Sensor des Tomographie-Messsystems eingebaut in umgebauter Glasblasensäule.

einer gewissen Verweilzeit von der ersten SBCR zusammen mit dem FT-Katalysator in die zweite SBCR. Hier wird das Wasser vom Sorbens desorbiert. Anschließend zirkuliert das regenerierte Sorbens zusammen mit dem FT-Katalysator wieder in die Reaktionsblasensäule.

Zur Untersuchung dieses neuartigen Reaktorkonzepts für Suspensionen wurde Ende des Jahres 2022 begonnen, ein Kaltmodell des Reaktors zu planen und aufzubauen. Mit Hilfe des Kaltmodells sollen diese Einflüsse bestimmt werden, so dass in einem nächsten Schritt die Reaktion in einer Heißanlage untersucht werden kann. Geplant ist für das Jahr 2023 die Inbetriebnahme des Kaltmodells, sowie erste Versuche zu verschiedenen Gasdurchsätzen, Füllstandshöhen, Säulendurchmessern und weiteren Parametern.

Die Forschungsarbeiten zur sorptionsgestützten Fischer-Tropsch-Synthese werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Frau M.Sc. Wiebke Asbahr durchgeführt.

Mehrphasige Fischer-Tropsch-Synthese ausgehend von ${\rm CO}$ und ${\rm CO}_2$

Die FT-Synthese kann direkt von CO_2 statt CO als Edukt stattfinden, wenn der verwendete Katalysator ebenfalls die RWGS katalysiert. Bei dieser Gleichgewichtsreaktion werden CO_2 und H_2 zu $\mathrm{H}_2\mathrm{O}$ und CO umgesetzt. Dies ist besonders interessant im Zusammenhang mit PtL-Prozessen, da CO_2 und H_2 als Edukte verwendet werden.

Im Verbundprojekt InnoSyn ("Innovative Syntheseprozesse zur Erzeugung chemischer Energieträger aus grünem Wasserstoff in lastflexiblen Blasensäulenreaktoren") wird die mehrphasige direkte FT-Synthese ausgehend von CO_2 untersucht. Der zu untersuchende Katalysator wird am Leibniz-Institut für Katalyse (LIKAT) in Rostock synthetisiert und charakterisiert. In der FT-Anlage vor Ort werden dann kinetische Studien im kontinuierlich

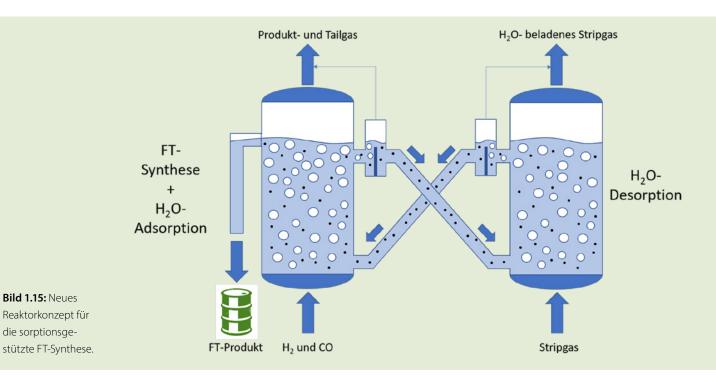
betriebenen Rührkessel anhand von Parametervariation durchgeführt. Mit den Ergebnissen wird anschließend ein kinetisches Modell erstellt, welches in ein bestehendes axiales Dispersionsmodell zur Beschreibung von SBCR eingepflegt wird.

Für das Projekt wurde ein bestehender Laboraufbau modernisiert und erweitert. Die finale Anlage ist in **Bild 1.16** zu sehen.

Die Anlage ist sowohl mit einem Rührkessel als auch einem Festbettreaktor ausgestattet, womit im selben Aufbau 2- und 3-phasige FT-Synthese verglichen werden können. Zur Quantifizierung der Permanentgase und Kohlenwasserstoffe bis zu einer Kettenlänge von C20 wurde ein neuer Online-GC beschafft. Zusätzlich wurde erstmalig für eine FT-Synthese ein durchstimmbarer Diodenlaser (engl. Tunable diode laser oder TDL) verbaut, mit dem wartungsarm und ohne Kalibrierung der Feuchtegehalt im heißen Produktgas bestimmt werden kann. Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte Ende 2022 in einer Versuchskampagne mit über 400 Betriebsstunden.

Die Reduktion und Aktivierung wurde in situ im Rührkessel durchgeführt. Nach erfolgreicher Aktivierung wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Eine Desaktivierung des Katalysators wurde aufgrund insignifikanter Änderungen der verwendeten reaktionstechnischen Kenngrößen ausgeschlossen. Mit den ermittelten Produktgaszusammensetzungen wurde ein simples kinetisches Modell erstellt.

In zukünftigen Kampagnen werden weitere Katalysatorsysteme untersucht und die Parameterstudie zu einer kinetischen Studie ausgeweitet. Kinetische Modelle werden erweitert, um das Produktspektrum zu beschreiben und in ein Reaktormodell für SBCR zu integrieren. Ferner wird der desaktivierende und inhibierende Effekt von $\rm H_2O$ sowie die in-situ Reduzierbarkeit verschiedener Katalysatoren durch das Zusammenspiel von $\rm H_2O$ -Dosierung und in-situ Messung mittels TDL experimentell ergründet.



16



Bild 1.16: FT-Laborapparatur für reaktionskinetische Studien.

Die Forschungsarbeiten zur mehrphasigen Fischer-Tropsch-Synthese werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn M.Sc. Philipp Graefe durchgeführt.

Upgrading einer biostämmigen Schwerbenzinfraktion

Mit der bioliq® Pilotanlage verfügt das KIT am Campus Nord über einen Prozess zur Produktion synthetischer Ottokraftstoffe aus biologischen Reststoffen wie z. B. Stroh (BTL). Der Vorteil der BTL gegenüber der strombasierten PTL-Route liegt in dem Potenzial, schon heute synthetische Kraftstoffe zu wettbewerbsfähigen Preisen produzieren zu können [1].

Der mit der bioliq® synthetisierte Kraftstoff besteht aus linearen und verzweigten Alkanen, Cycloalkanen, Alkenen sowie mit >75 Vol.-% zum größten Teil aus methylierten Aromaten. Diese hohe Aromatenkonzentration ist auf den zugrunde liegenden Dimethylether-(DME)-to-Gasoline (DTG) Prozess zurückzuführen. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wird der bioliq® Kraftstoff destillativ in ein Leicht- und Schwerbenzin aufgetrennt und das Schwerbenzin über Hydroprocessing am EBI an die motorischen Anforderungen angepasst.

Sowohl fossile als auch erneuerbare Kraftstoffe müssen in Deutschland die gängige Norm EN 228 einhalten. Der Aromatengehalt des bioliq® Kraftstoffs liegt zum einen deutlich über der maximal erlaubten Konzentration von 35 Vol.-%, zum anderen resultiert aus dem hohen Aromatengehalt ein Defizit an Leichtsiedern, vor allem solchen mit Siedetemperaturen bis 100 °C. Um die beschriebenen Nachteile auszugleichen, wurde das Upgrading des durolhaltigen Schwerbenzins durch Hydroprocessing näher untersucht [2]. Obwohl die Arbeiten mit einer klaren Verbesserung einhergingen, konnte ein zu 100 % erneuerbarer normgerechter Kraftstoff nicht bereitgestellt werden. Im Folgenden wurde deshalb das im Raffineriebetrieb übliche Blending, das heißt das Mischen verschiedener Stoffströme, unter Berücksichtigung der Norm näher untersucht.

Besonders vielversprechend sind Oxygenate, da sie nicht nur eine verhältnismäßig niedrige Siedetemperatur, sondern auch eine hohe Oktanzahl besitzen. Bei systematischen Blend-Versuchen zeigte vor allem die Kombination von Methanol und Ethyltert-butlyether (ETBE) vielversprechende Ergebnisse. Kurze Alkohole bilden mit Kohlenwasserstoffen azeotrope Gemische, was zu einem Abflachen der Siedelinie und folglich zu einer Erhöhung des E70 und E100 führt. Die Hinzunahme von ETBE führte bei den Experimenten zu einem weiteren Abflachen des mittleren Teils der Siedelinie. Wie in Bild 1.17a für den Blend B zu sehen, resultiert eine gleichmäßige Siedelinie aus dem ursprünglich bauchigen Verlauf des bioliq® Leichtbenzins (LG). Dies ist besonders auffällig im Vergleich zu einem Blend des bioliq® Kraftstoffs mit Methanol und Ethanol (Blend A). Dieser weist eine deutliche "Stufenform" in der Siedelinie auf, was für die tatsächliche Ausbildung eines Azeotropes spricht. Eine gleichmäßige Siedelinie ist für eine ungestörte Verdampfung des Kraftstoffs im Motor und folglich für ein Minimum an Emissionen entscheidend. Wie in Bild 1.17b zu sehen, konnte im Rahmen der Arbeit mit dem Blend B ein nahezu normgerechter Kraftstoff zur Verfügung gestellt werden.

Das Upgrading mittels Hydroprocessing bietet nicht nur eine Lösung, die petrochemischen Parameter von Kohlenwasserstoffströmen an Anforderungen chemisch anzupassen, sondern auch die Möglichkeit, biomassebasierte Ströme in Raffinerien zu integrieren und so den erneuerbaren Anteil zu erhöhen. Üblicherweise sind in Raffinerien sogenannte Hydrotreater vorzufinden, welche zur Entfernung von Heteroatomen wie Schwefel eingesetzt werden. Hydrotreater nutzen hydrier-aktive Katalysatoren wie Kobalt-Molybdän (CoMo), welche gleichermaßen zum Sättigen aromatischer Verbindungen eingesetzt werden können. Am EBI ceb wurde deshalb im Rahmen der Masterarbeit von Johannes Waßmuth und in Kooperation mit der Mineralölraffinerie Oberrhein (MiRO) das Co-processing des aromatenreichen bioliq* Schwerbenzins mit fossilem Mitteldestillat untersucht. Der

Ansatz war, die Aromaten zu hydrieren, sodass sie als Teil des Mitteldestillats weiter prozessiert werden können, möglichst ohne dessen Cetanzahl zu beeinflussen. Um eine mögliche Deaktivierung des Katalysators zu beurteilen, wurde der Reaktor 24/7 für mehr als 2000 h kontinuierlich betrieben. Als Feed diente eine Mischung aus 85 % fossilem Mitteldestillat und 15 % bioliq[®] Schwerbenzin. Im Rahmen der Arbeit wurde gezeigt, dass mehr als 80 % der Aromaten zu Naphthenen umgesetzt wurden und so ein negativer Einfluss der Aromaten auf die Cetanzahl minimiert wurde (Verlust Cetanzahl ~2).

Wie im ersten Abschnitt erläutert, ist das Rußverhalten, also die Tendenz eines Kraftstoffs während der Verbrennung Partikel zu bilden, direkt von den petrochemischen Parametern wie der Siedelinie und somit der Zusammensetzung des Kraftstoffes abhängig. Um nachhaltige und gesundheitlich möglichst unbedenkliche Kraftstoffe zu entwickeln, müssen neben den in der EN 228 definierten petrochemischen Parametern zusätzliche Größen wie die Rußbildungstendenz herangezogen werden. Die Rußbildungstendenz wird z.B. mit dem Yield Sooting Index (YSI) ausgedrückt, welcher sehr gut mit der Anzahl der bei der motorischen Verbrennung emittierten Partikel korreliert. Die Messung erfolgt mit einem sogenannten "Yale Coflow Burner" im Labormaßstab. Aufgrund der hohen Komplexität der Messvorrichtung ist diese nicht standardmäßig in Laboren vorzufinden, beziehungsweise die Beschaffung mit hohen Kosten verbunden. Am EBI ceb wurde deshalb eine Anwendung entwickelt, um den YSI auf der Grundlage der weitverbreiteten Infrarotspektroskopie zu bestimmen. Infrarotspektren eignen sich besonders für die Abbildung struktursensitiver Informationen, da die Molekülschwingungen einzigartige Signale ähnlich einem Fingerabdruck erzeugen. Am EBI ceb wurden über 330 Mischungen hergestellt, um damit ein künstliches neuronales Netz (KNN) zu trainieren (siehe Bild 1.18).

Das KNN ist in der Lage, die Absorptionsbanden den Rußbildungstendenzen, also dem YSI, für bekannte Proben zuzuordnen und ist auch in der Lage, den YSI für unbekannte Proben vorherzusagen. Im Rahmen der Arbeiten konnte ein Fehler ≤10 % bestätigt und folglich die Anwendbarkeit auf reale Systeme

nachgewiesen werden. Die Arbeiten wurden im Rahmen der Masterarbeit von Wiebke Asbahr durchgeführt und in Form eines Patents veröffentlicht. Eine Weiterentwicklung des Tools sowie die Anwendungen in kommenden Projekten sind geplant.

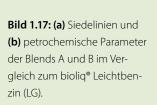
Die Forschungsarbeiten zum Upgrading einer biostämmigen Schwerbenzinfraktion werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn M.Sc. David Graf durchgeführt.

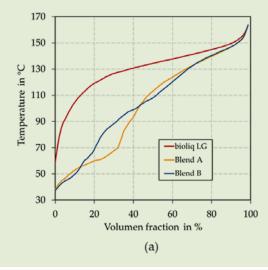
EU-weiter Austausch und Fortbildung internationaler Wissenschaftler:innen

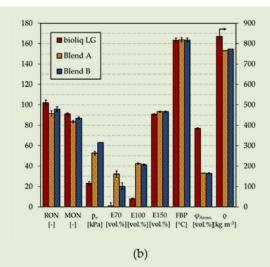
Neben laufenden Forschungsarbeiten ist die AG an einem EU-weiten Projekt zum Informationsaustausch, dem sogenannten Twinning beteiligt. Unter dem Titel "Waste to Hydrogen" werden für wissenschaftliche Mitarbeiter Fortbildungen, Auslandsaufenthalte, Karrieretrainings, Workshops und Führungen an den teilnehmenden Einrichtungen in Schweden, Italien, Deutschland und Portugal organisiert. Ziel ist es, vor allem die portugiesischen Wissenschaftler in Sachen Networking, Perspektiven und Erfahrungen zum Thema Wasserstoffgewinnung und -Nutzung aus Restbiomasse fortzubilden. In 2022 wurden hierzu am KIT ein "Exploratory visit" sowie ein zweiwöchiges Event bestehend aus Workshop, Summer School und Karrieretraining für das Projektkonsortium und interessierte Stakeholder organisiert. Hier wurden über 20 Fachvorträge zu den Themen Vergasung und Synthesegasanalytik von Partneruniversitäten und der Industrie gehalten und Exkursionen für die ca. 30 Teilnehmer zur BASF in Ludwigshafen organisiert. Ein Karrieretraining wurde mit externen Experten spezifisch auf die Bedürfnisse und Anforderungen der portugiesischen Wissenschaftler angepasst.

Zwei Doktoranden aus Portugal begleiteten die Inbetriebnahme der FT-Anlage im Rahmen eines Austausches im November 2022. Alle diese Tätigkeiten fanden im Rahmen des EU-Projektes Waste2H2 statt.

Gefördert durch die COST-Action WIRE (Waste biorefinery technologies for acelerating sustainable energy processes) wurde ein 4-wöchiger Aufenthalt bei BEST (Bioenergy and Sustainable Technologies) in Wien gefördert. Hier begleitete Herr







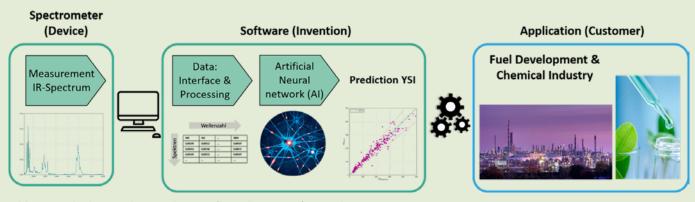


Bild 1.18: Methode zur Vorhersage des YSI auf Grundlage von Infrarotspektren.

Graefe die Inbetriebnahme des dort gebauten Blasensäulenreaktors zur FT-Synthese im Pilotmaßstab. Für die Zukunft sind weitere Austausche und gemeinsame Projekte im Bereich der FT-Synthese geplant.

Literatur

- D. Graf, X. Koroveshi, T. Kolb, R. Rauch, Chem. Ing. Tech. 2022, 94 (3), 267 – 280. DOI: 10.1002/cite.202100154.
- [2] D. Graf, P. Neuner, R. Rauch, Energy Eng. 2022, 119 (6), 2169 2192. DOI: 10.32604/ee.2022.022759.

1.6 Aus der Tätigkeit des Bereichs Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI, DVGW gt

1.6.1 Arbeitsgruppe "Systeme und Netze"

Wolfgang Köppel, Maximilian Heneka, Christian Hotz, Volkan Isik, Arvind Menon, Lisa Merz, Jithin Mohan, Praseeth Prabhakaran, Louis Wayas, Azif Zubair

In der Arbeitsgruppe Systeme und Netze werden Konzepte zur Transformation von Energiesystemen und insbesondere der Gasinfrastruktur im Zuge der Energiewende entwickelt. Hierzu gehören die Themenfelder klimafreundliche Gase wie Biomethan oder Wasserstoff, Sektorenkopplung auf Verteilnetzebene und die kommunale Wärmeplanung. Methodisch werden Netzund Energiesystemsimulationen sowie techno-ökonomische und ökologische Analysen bewertet. Beispielhaft werden im Folgenden Ergebnisse der Projekte "Transformation der Gasinfrastruktur zum Klimaschutz" im Auftrag des Umweltbundesamtes sowie "Roadmap Gas 2050" (DVGW) vorgestellt.

Transformation der Gasinfrastruktur zum Klimaschutz

In den letzten Jahren hat sich in der wissenschaftlichen Debatte ein weitgehender Konsens entwickelt, dass eine THG-neutrale Energieversorgung, selbst im Fall von einem hohen Maß an Elektrifizierung und Energieeffizienz auf THG-neutrale gasförmige Energieträger angewiesen sein wird. Die benötigten Gasmengen werden jedoch gerade in Verteilnetzen sinken und der fossile Energieträger Erdgas muss durch klimafreundliche Gase wie Bio-

methan oder Wasserstoff ersetzt werden. Dies bedeutet einerseits, dass Netzabschnitte obsolet werden und rückgebaut oder anderweitig, z. B. als Leerrohre für elektrische Leitungen oder für Kohlenstoffdioxidtransport genutzt werden könnten. Andererseits müssen bei der Umstellung auf Wasserstoff Kundenanlagen modifiziert bzw. ausgetauscht werden. Im Rahmen des Projektes wurden daher die genannten Weiternutzungsoptionen der Gastransport- und der Gasverteilnetze hinsichtlich technischer Machbarkeit sowie des zeitlichen, finanziellen und ökonomischen Aufwands bewertet (Bild 1.19 und Bild 1.20).

Bei der Nutzungsoption Wasserstoff wird für die Gastransportnetze eine zum Erdgas parallele Infrastruktur angestrebt, wobei Teile des vorhandenen Gastransportnetzes auf den Wasserstoffbetrieb umgestellt werden sollen. Bei den Gasverteilnetzen sollen dagegen Netzgebiete komplett auf Wasserstoff umgestellt werden, so dass möglichst keine parallelen Infrastrukturen in einem Netzgebiet betrieben werden. Bei der Umnutzung von Transport- und teilweise von Verteilnetzleitungen für den CO₂-Transport bzw. als Leerrohre scheinen die Unwägbarkeiten hingegen vergleichsweise höher. CO₂ wird in Gasleitungen üblicherweise in überkritischem Zustand transportiert, um die Vorteile eines überkritschen Fluids mit hoher Dichte aber geringer Viskosität zu nutzen. Dies bedeutet jedoch, dass zur Vermeidung unbestimmter Zustände wie z. B. Mehrphasenströmung oder Phasenwechsel die mittleren Drücke zwischen 85 und 150 bar liegen müssen, für die die Bestandsleitungen in allen Netzen nicht ausgelegt sind. Die Umnutzung von Rohren als Leerrohre für Daten-, Strom- und/oder Glasfaserkabel scheint mit einem hohen Aufwand für das Einziehen verbunden zu sein. Auch wird gerade in Verteilnetzen der Biegeradius der Kabel als problematisch angesehen. In Transportnetzen können thermische Probleme bei Gleichstromleitungen und induktive Probleme bei Wechselstromleitungen entstehen.

Somit kann festgehalten werden, dass die Gasinfrastruktur für eine Wasserstoffnutzung relativ einfach umgerüstet werden kann. Dagegen scheinen andere Nutzungsstrategien wie die Nutzung als CO₂-Leitung oder als Leerrohr nicht durchgängig erfolgversprechend.

Roadmap Gas 2050

Im DVGW-Forschungsvorhaben Roadmap Gas 2050 wurde untersucht, wie die Klimaziele mit Hilfe von klimafreundlichen Gasen erreicht werden können. Hierbei wurden Fragestellungen zur Gasbereitstellung, zum Gastransport sowie zur Gasverteilung und -nutzung bearbeitet und die Erkenntnisse in eine modellbasierte Energiesystemanalyse integriert.

Es konnte gezeigt werden, dass die Ziele der Energiewende für 2030 und 2045 auch mit dem Fokus auf klimafreundliche Gase erreicht werden können und dass gasförmige Energieträger weiterhin ein wichtiger Eckpfeiler der Energieversorgung sein werden. Für die Pfadumsetzung stehen in Europa Bereitstellungspotenziale an erneuerbaren Gasen (Wasserstoff, Biomethan, SNG) von ca. 5.000 TWh bis 2050 mit Bereitstellungskosten von 7 - 12 Cent/kWh zur Verfügung. Des Weiteren können die vorhandenen Gasinfrastrukturen auf die regenerativen Gase mit überschaubaren Kosten von 1,3 - 2,6 Mrd. €/Jahr bis 2045 auf Wasserstoff angepasst werden.

Aufgrund der politischen Vorgaben zum Ausbau von erneuerbaren Energien werden in einem Szenario mit Schwerpunkt Wasserstoff 2045 1.172 TWh elektrische Energie in Deutschland

erzeugt. Insgesamt werden davon ca. 87 % durch Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen sowie durch PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 631 GW bereitgestellt. Bereits 2030 werden ca. 36 TWh Strom zur inländischen Wasserstofferzeugung eingesetzt, was ca. 6 % der volatilen Stromerzeugung darstellt. Bis 2045 wächst dieser Anteil auf ca. 38 % (388 TWh) an. Weiter konnte gezeigt werden, dass im Jahr 2045 eine Elektrolysegesamtleistung in Deutschland von ca. 111 GW benötigt wird, um die Erzeugungsspitzen im Sommer ausregeln zu können (Bild 1.21). Im Winter sinkt der Leistungsbedarf auf 73 GW. Somit führen die deutschen Ausbauziele für erneuerbare Energien zu einem hohen Bedarf an Elektrolysekapazitäten und Speicheraufbau zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und zum Flexibilitätsausgleich.

Im Simulationszeitraum von 2020 bis 2045 sinkt der Wärmebedarf im Gebäudesektor um 46 %. Verantwortlich dafür sind energetische Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle, effizientere Heizungstechnologien sowie die Nutzung anderer Energieträger. Bei den Berechnungen wurde eine moderate jährliche Sanierungsrate von 1,4 %/a unterstellt. In 2030 finden noch 248 TWh gasbasierte Energieträger (Erdgas, Wasserstoff, Biomethan)



- 0: Nicht zutreffend
- 1: Nicht umsetzbar
- Kann kurzfristig durchgeführt werden
- 3: Kann mittelfristig durchgeführt werden
- 4: Kann langfristig durchgeführt werden

Bild 1.19: Bewertung der Umnutzungsoptionen des Gasverteilnetzes.



- 0. Nicht zutreffend
- 1: Nicht umsetzbar
- 2: Kann kurzfristig durchgeführt werden
- 3: Kann mittelfristig durchgeführt werden
- 4: Kann langfristig durchgeführt werden

Bild 1.20: Bewertung der Umnutzungsoptionen des Gastransportnetzes.

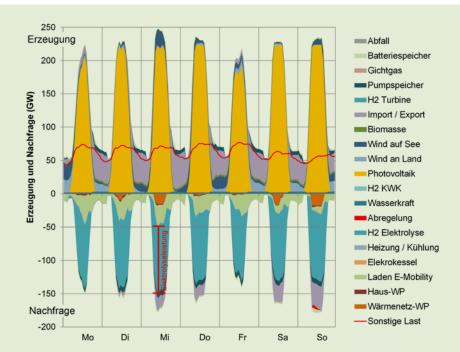


Bild 1.21: Kraftwerkseinsatz Deutschland im Wasserstoffszenario (2045, Kalenderwoche 24).

eine Verwendung im Gebäudesektor. Bis 2045 geht der Anteil der fossilen Energieträger auf null zurück und es werden noch 101 TWh grüner Wasserstoff und Biomethan genutzt. Dieser Rückgang (Bild 1.22) bis 2045 von ca. 70 % spiegelt sich nicht in dem im Verteilnetz verteilten Gasvolumenstrom wider. Durch die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff gehen die verteilten Gasmengen aufgrund des geringeren Brennwerts von Wasserstoff bezogen bis 2045 um nur ca. 32 % zurück.

Literatur

Heneka, M.; et al.: H_2 the gas network; FVV no. 1384; FVV-Informationstagung | Frühjahrstagung 2022 – Würzburg; 31. März 2022.

Heneka, M.; Köppel, W.; Schlautmann, R.; Graf, F.; Sperlich, J.; Rau, C.; Hüttenrauch, J.; Lubenau, U.; Hoffmann, M.; Sökeland, H.; Bothe, D.; Heinz, L.; Blesinger, G.; Chavali, A.: H₂ im Gasnetz und die Interaktion mit Gasmotoren; energie wasser praxis 6/7 2022.

Poppenborg, R.; Chlosta, M.; Ruf, J.; Hotz, C.; Düpmeier, C.; Kolb, T.; Hagenmeyer, V.:

Energy Hub Gas: A Modular Setup for the Evaluation of Local Flexi ineering)
2022 in Oshawa, Kanada; 10-12.08.2022.

Mörs, F.; Heneka, M.; Graf, F.; Bäuerle, M.; Benthin, J.: Zur Bewertung der THG-Emissionen von türkisem Wasserstoff: Entscheidend ist, was vorne reingehtl; energie wasser praxis 5/ 2022.

1.6.2 Arbeitsgruppe "Verfahrenstechnik"

Friedemann Mörs, Katharina Bär, Johanna Gegenheimer, Peter Kussin, Christiane Staudt, Christian Müller, Ruth Schlautmann, Michael Schneider

Um einen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland zu leisten, arbeitet die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik an verfahrenstechnischen Lösungen für eine nachhaltige Bereitstellung von Energie und Molekülen. Die Arbeiten umfassen experimentelle und theoretische Untersuchungen zu den Themengebieten Wasserstoff-, Biomethan- und Erzeugung von SNG (Substitute Natural Gas), CO₂-Abscheidung und Gasreinigung sowie biologische und katalytische Methanisierung. Dabei ist das Ziel, durch anwendungsnahe Forschung die Übertragung von Wissen zum Entscheidungsträger und die Übertragung von technischen Lösungen in die Anwendung zu beschleunigen. Dieses Ziel verfolgt die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik sowohl im Rahmen von öffentlich geförderten Projekten als auch bei der Zusammenarbeit mit Industriepartnern im Rahmen von Studien. Im Folgenden werden exemplarisch die öffentlich geförderten Forschungsprojekte "H2Mare PtX-Wind" (BMBF) und "BGA-Cluster" (BMEL) vorgestellt.

H2Mare PtX-Wind

Offshore-Windenergieanlagen der Zukunft produzieren nicht nur Elektronen, sondern auch Moleküle. Grüner Wasserstoff kann offshore hergestellt und entweder über Pipelines an Land transportiert oder direkt zu weiteren chemischen Energieträgern wie SNG, Ammoniak, Fischer-Tropsch-Syncrude oder Methanol weiterverarbeitet werden. Diese dienen z. B. als Grundstoffe in der

Bild 1.22: Gasbedarf Deutschland.

	Gasbedarf in TWh			Gasbedarf ¹) in Mrd. m ³		
2020	340		70 %	30,4		32 %
2030	248	60 %	2020 bis 2045	25,4	19 %	2020 bis 2045
2045	101	2030 bis 2045		20,7	2030 bis 2045	

¹⁾ Volumetrischer Gasbedarf auf Basis von Erdgas mit einem Brennwert von 11,2 kWh/m3 (NTP) und Wasserstoff mit einem Brennwert von 3,54 kWh/m3 (NTP) berechnet

chemischen Industrie oder können für die Herstellung von Kraftstoffen verwendet werden.

Weiterhin entfallen die Kosten für den elektrischen Netzanschluss an Land, da die elektrische Energie direkt offshore in Elektrolyseanlagen genutzt wird. Dadurch kann die Überlastung des Stromnetzes vermieden und eine netzbedingte Abregelung von Offshore-Windkraftanlagen verhindert werden.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Leitprojekts H2Mare wird diese Vision im Rahmen von vier Verbundvorhaben von 32 Projektpartner ganzheitlich untersucht.

Im Verbundvorhaben "H2Mare PtX-Wind" werden Lösungen zur Offshore-Weiterverarbeitung von grünem Wasserstoff in die chemischen Energieträger LNG, Methanol, Fischer-Tropsch-Syncrude und Ammoniak erarbeitet. Die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik kümmert sich insbesondere um die Offshore-LNG-Erzeugung und leitet das zentrale Arbeitspaket "Power-to-X-Prozesse". Hier werden die unterschiedlichen PtX-Prozesse untersucht und in Pilotanlagen demonstriert.

Für die Offshore-LNG-Erzeugung wird in der Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik an einem für die Offshore-Umgebung ideal angepassten Gesamtprozess gearbeitet. Besondere Herausforderung ist der autarke Betrieb der Prozesskette bei fluktuierender Bereitstellung der elektrischen Energie aus einem Windpark. Ausgehend von der grundlegenden Prozesskette (Bild 1.23) wird modellbasiert an der idealen Verschaltung der Prozessschritte für eine Anlage mit einer Anschlussleistung der Elektrolyse von 100 MW gearbeitet. Dazu wurden Modelle für Methanisierung und Verflüssigung in die Modelle der Gesamtprozesskette integriert. In diesen Gesamtmodellen werden neben der Elektrolyse auch stoffliche Speicher für CO₂ und H₂, Stromspeicher und das Wassermanagement dargestellt. In einem ersten Schritt wurde der Prozess in stationären Modellen verfahrenstechnisch abgebildet. Im nächsten Schritt werden in dynamischen Modellen z. B. Einflüsse von Lastwechsel sowie An- und Abfahrverhalten auf den Prozess untersucht. In den Modellen soll ein optimiertes Anlagendesign entwickelt werden, sodass auch bei variierenden Stromlasten die Anlage betrieben werden kann. Dazu zählt auch, Regelungskonzepte für den dynamischen Betrieb zu entwickeln. Es erfolgt ein optimiertes Wärmemanagement aller Anlagen, sodass Wärmeverluste minimiert werden.

Ausgehend von der Modellierung wird die Gesamtprozesskette am Energylab 2.0 demonstriert. Dazu wird aktuell an der Verschaltung einer zweistufigen Wabenmethanisierung mit einer Gasaufbereitung und einer Verflüssigungsanlage gearbeitet. Dieser Anlagenverbund wird im Projektverlauf sowohl statio-

när als auch dynamisch betrieben. Aktuell wird eine bestehende Methanisierungsanlage grundlegend erneuert, um verschiedene Arten von Wabenreaktoren in zwei Reaktorstufen mit Zwischenkondensation untersuchen zu können. Bei Auslegung der Methanisierungsreaktoren arbeitet die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik im Projekt H2Mare eng mit der Gruppe "Katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung" zusammen. Der Aufstellungsplan der Anlage ist in Bild 1.24 dargestellt. Die Reaktoren können dabei zwischen den Versuchskampagnen getauscht werden. Die Anlagenkapazität wird auf eine Ausgangsleistung von 100 kW (bezogen auf den Heizwert von Methan) erhöht, um den Einfluss des Upscalings der Wabenstrukturen besser untersuchen zu können. Die Gasaufbereitung besteht aus einer chemischen CO₂-Wäsche mit ionischen Flüssigkeiten und einer Feinreinigung, um CO₂ und Wasser bis auf wenig ppm abzutrennen und so die Spezifikationen der Verflüssigung einzuhalten. Die Verflüssigung erfolgt mithilfe einer Stirling-Maschine. Bauartbedingt ermöglicht diese eine Abtrennung von Wasserstoff im Kopf der Maschine, welcher in den Prozess zurückgeführt werden kann.

Im Anschluss fließen die Ergebnisse der Demoanlagen und der Modellierung in technoökonomische Bewertungen ein. Hier werden Gestehungskosten abgeschätzt und Kosten für Logistik wie der Transport der Edukte und Produkte ausgewertet.

BGA-Cluster

Biomethan aus Biogasanlagen kann einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland leisten. Zusätzlich unterstützt die heimische Erzeugung von Biogas die Unabhängigkeit der deutschen Gasversorgung von ausländischen Gasimporten.

Beim Großteil der ca. 10.000 existierenden Biogasanlagen wird das erzeugte Biogas in Blockheizkraftwerken vor Ort verstromt. Die dabei anfallende Abwärme kann in vielen Fällen nur begrenzt genutzt werden, außerdem ist das Flexibilisierungspotenzial aufgrund begrenzter Gasspeicherkapazitäten an den Anlagen limitiert. Diese Nachteile können bei der Aufbereitung und Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz als Biomethan umgangen werden. Allerdings ist der Bau und Betrieb einer Biogasaufbereitungsanlage nur für größere Anlagen wirtschaftlich sinnvoll. Der Zusammenschluss mehrerer Biogasanlagen zu einem Cluster mit zentraler Biogasaufbereitung und -einspeisung ist daher eine Option für den wirtschaftlichen Weiterbetrieb von Biogasanlagen (Bild 1.25) auch außerhalb des Erneuerbaren-Energien-Gesetztes (EEG).

Bild 1.23: Grundlegende Prozesskette der Offshore-LNG-Erzeugung.



Das vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderte und von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. getragene Projekt "BGA-Cluster" wird von der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut koordiniert. Gemeinsam mit den Projektpartnern Universität Hohenheim, Fachverband Biogas e. V., Erdgas Südwest GmbH, keep it green GmbH und Grinix GmbH werden verschiedene Zukunftsperspektiven von Biogasanlagenclusterung untersucht und ein Leitfaden zur schnellen Umsetzung in die Praxis entwickelt.

Für die Ausarbeitung des Leitfadens werden in dem Projekt drei konkrete Clusteroptionen eingehend untersucht. Gemeinsam mit der Erdgas Südwest GmbH und dem Fachverband Biogas e. V. sucht die DVGW-Forschungsstelle drei geeignete Standorte, die von der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB) der Universität Hohenheim hinsichtlich des Umrüstungsbedarfs analysiert werden.

Die Auswahl der Cluster erfolgt auf Basis von Standortdaten aus dem Marktstammdatenregister und einer Umfrage des Fachverband Biogas. Nach der Auswahl drei geeigneter Cluster fanden in 2022 zwei Lokalveranstaltungen (Bild 1.26) statt, um in den Austausch mit interessierten Biogasanlagenbetreibern in den Wahlregionen zu kommen. In diesen Veranstaltungen wurden die technischen Voraussetzungen ihrer Biogasanlage sowie wirtschaftlichen Vorteile eines Zusammenschlusses zu einem Cluster diskutiert. Für die Bewertung der Cluster werden nachfolgende weitere Fragebögen verteilt, um technische Daten der Biogasanlagen zusammenzutragen. Auf Basis der Fragenbögen werden die drei Modellstandorte durch DVGW-EBI bewertet. Einer der Cluster wird von der keep it green GmbH im Detail projektiert, um belastbare Zahlen für eine technoökonomische Bewertung des Standorts zu erhalten.

Alle Informationen zu regulatorischen Fragestellungen sowie technoökonomischen Kennzahlen werden in einem Leitfaden zusammengeführt.

1.6.3 Arbeitsgruppe "Materialprüfung"

Andreas Strauß, Jörg Riedl

Der Fokus der Prüftätigkeiten im akkreditierten Materialprüflabor liegt auf Baumuster- und Kontrollprüfungen, insbesondere für Dichtungsmaterialien, Korrosionsschutzmaterialien und Hilfsstoffe, wie Dichtstoffe, Schmierstoffe, Lecksucher und Odoriermittel für einen weltweit ansässigen Kundenstamm.

In zunehmendem Maße werden Prüfungen für Wasserstoff und weitere Gase der Energiewende nachgefragt. Im Rahmen von Projekten der DVGW-Forschung (z. B. F&E für H₂, HydEKuS) werden relevante Parameter ermittelt und aus den Erkenntnissen Prüfmethoden entwickelt. In sogenannten Zertifizierungsprogrammen der DVGW CERT werden diese Prüfmethoden veröffentlicht und als temporäre Prüfgrundlage zur ergänzenden Zertifizierung zur Basiszertifizierung herangezogen. Die gewonnenen Daten werden von den Mitarbeitern, die in nationalen und internationalen Regelsetzungsgremien tätig sind, als Grundlage für die Fortschreibung von allgemeingültigen Normen mit spezifischen Anforderungen eingebracht. Die durch DVGW CERT vergebenen Zusatzzertifizierungen werden in einem eigenständigen Verzeichnis erfasst.

In größerem Umfang wurden bisher Elastomerwerkstoffe bzgl. ihrer $\rm H_2$ -Permeabilität nach DVGW CERT ZP 5101 charakterisiert, das basierend auf Erkenntnissen aus dem Projekt F&E für $\rm H_2$ entwickelt wurde. Die Prüfmethode findet auch bei anderen Werkstofffamilien großes Interesse. Diagramm 1 zeigt exemplarisch ermittelte Permeabilitäten nach Werkstofffamilien geclustert. Es wird jeweils die niedrigste und höchste gemessene Permeabilitätswert für unterschiedliche Werkstofffamilien sowie das jeweilige arithmetische Mittel dargestellt. Die Datensammlung wird fortgeführt und für Normungszwecke genutzt (Bild 1.27).

Im Rahmen des DVGW-Projektes H_2 &Werkstoffe (HydEKuS) werden u. a. Flachdichtungswerkstoffe und Schmierstoffe in Wechselwirkung mit H_2 untersucht und bei entsprechender Erfordernis Zertifizierungsprogramme erstellt. Weitere Zertifizierungsprogramme werden folgen.

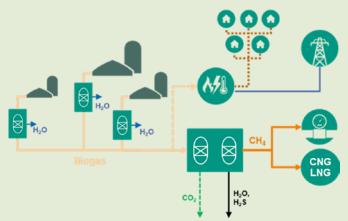


Bild 1.25: Clusterung von Biogasanlagen mit verschiedenen Nutzungsoptionen.



Bild 1.26: Lokalveranstaltung im Cluster Süd mit ca. 40 interessierten Biogasanlagenbetreibern aus der Region.

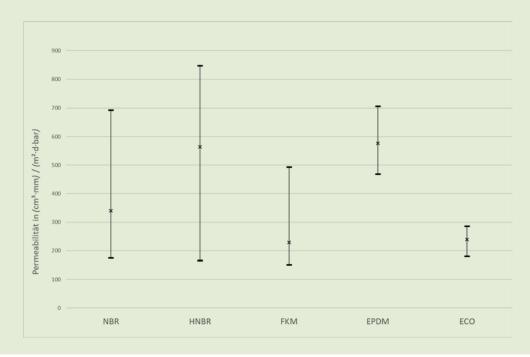


Bild 1.27: Ermittelte Permeabilitäten nach Elastomerfamilien.

Bild 1.28 zeigt einen neu angeschafften Prüfstand, der zur Charakterisierung von Flachdichtungswerkstoffen mit $\rm H_2$ und ggf. weiteren Gasen der Energiewende Anwendung findet.

Im Rahmen der Regelwerksarbeit stand die Überarbeitung von national und international geltenden Normen im Vordergrund:

- **DIN EN 751-3** "Dichtmittel für metallene Gewindeverbindungen in Kontakt mit Gasen der 1., 2. und 3. Familie und Heißwasser Teil 3: Ungesinterte PTFE-Bänder und Fäden", August 2022
- **DIN EN 549** "Elastomer-Werkstoffe für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten und Gasanlagen" wird um Anhang 1 mit optionalen Prüfungen erweitert, Veröffentlichung im Q2 2023 erwartet
- **DVGW CERT ZP 5101** "Zertifizierungsprogramm Verträglichkeit und Permeationseigenschaften von Elastomerwerkstof-

fen für Dichtungen u. Membranen in Gasgeräten u. -anlagen gegenüber Wasserstoff für einen Gehalt von bis zu 100 Vol. % $\rm H_2$ ", veröffentlicht Dezember 2021 und in 2022 um englische Fassung erweitert

- DVGW-Information GAS/WASSER Nr. 27 Korrosionsschutz
 Überblick Merkmale und Prüfmethoden von Werks- und Nachumhüllungen; Veröffentlichung der bisher bearbeiteten Prüfungen August 2021 und August 2022, das Dokument wird weiter fortgeschrieben
- **Technischer Hinweis Merkblatt DVGW G 406** (M) Anforderungen an neue Gasarmaturen in H₂-Anwendungen für Gastransport, Gasverteilung und Gasinstallation, veröffentlicht Januar 2023

1.6.4 Arbeitsgruppe "Brennstofflabor"

Jochen Schütz, Kerstin Kröger

Neben der Durchführung standardisierter, genormter und akkreditierter Analyse- und Probenahmeverfahren ist die Arbeitsgruppe Brennstofflabor umfangreich in die Forschungsaktivitäten des Bereichs Gastechnologie eingebunden. Hierbei liegt die Kernkompetenz des Labors auf der Probenahme und Analyse gasförmiger Brennstoffe, ihrer Edukte sowie Zwischenprodukten, Gasbegleitstoffen und prozessbedingter Verunreinigungen. Das Brennstofflabor verfügt über eine Vielzahl modernster, chromatographischer und spektroskopischer Analysengeräte, Probenahmeapparaturen und -methoden.

Die Arbeitsgruppe beschäftigte sich 2022 vor allem mit der Erweiterung der Expertise im Themenkomplex Wasserstoff. Hierzu zählen die vollumfängliche Analytik der Gasbeschaffenheit, die Bestimmung von Gasbegleit- und Spurenstoffen und verschiedene Probenahmemethoden.

Im Rahmen des Wasserstoff-Leitprojekts Get $\rm H_2$ TransHyDE (BMBF) war der Aufbau und die Inbetriebnahme eines Wasserstofflabors eine der Kernaufgaben in 2022. Hier werden zukünftig Wasserstoffproben unterschiedlicher Reinheitsklassen analysiert, Probenahmen vorbereitet und Laborversuche zur adsorptiven Wasserstoffreinigung durchgeführt (Bild 1.29).

Darüber hinaus wurde das vom BMDV geförderte Forschungsprojekt "RingWaBe – Vergleichbarkeit der Wasserstoffqualitätsanalytik" eingeworben und ist im Dezember 2022 gestartet. Es läuft im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) Phase II und wird durch die NOW GmbH koordiniert. Ziel des

Projekts ist die Vergleichbarkeit von Wasserstoffqualitätsanalytik/-reinheit gem. DIN EN 17124. Ebenso soll eine Validierung der Prüflabore, Analysengeräte/-methoden und Probenahmeverfahren nach ISO 21087:2019 durchgeführt werden. Auch sicherheitstechnische Aspekte bei der netzgebundenen Verteilung von Wasserstoff in der öffentlichen Versorgung rücken zunehmend in den Fokus der anwendungsorientierten Forschung. Hierzu wurden im Rahmen der betrieblichen Forschung, verschiedene DVGW-Forschungsprojekte bearbeitet.

Das DVGW-Forschungsvorhaben "H₂-OdoSen – Voruntersuchung zur sensorbasierten Ergänzung des Sicherheitskonzepts für die Gasversorgung mit Wasserstoff" wurde zum 01.09.2022 gestartet. Projektziel ist es, das Sicherheitskonzept bei Gasleckagen hinsichtlich zwei Fragestellungen zu evaluieren. Einerseits werden Odorierungsaspekte wasserstoffhaltiger Gase in der öffentlichen Gasversorgung adressiert, andererseits sollen die Möglichkeiten eines alternativen bzw. ergänzenden Sicherheitskonzepts mit sensorbasierter Gasdetektion von Erdgas (-Wasserstoffgemischen) und Wasserstoff betrachtet werden.

Das DVGW-Forschungsvorhaben "H₂-Odor – Wassestoff-Odorierung als Sicherheitselement bei der Versorgung der Allgemeinheit (Phase 1)" wurde ebenfalls zum 01.09.2022 gestartet. Von DVGW-EBI wurden bereits olfaktorische Tests durchgeführt zur Bewertung der Geruchscharakteristik und -intensität verschiedener etablierter Odoriermittel bei der Verwendung mit Wasserstoff.

Im Bereich Methodenentwicklung hat die Arbeitsgruppe Brennstofflabor sowohl an neuen Messmethoden als auch an Probenahmeverfahren gearbeitet. So konnte z. B. eine neue Apparatur zur Probenahme von Flüssiggas (LPG) konzeptioniert



Bild 1.28: Prüfstand zur Charakterisierung von Flachdichtungswerkstoffen.

Bild 1.29: Analytik im Wasserstofflabor.



und umgesetzt werden. Ebenso wurde die Planung für den Bau einer Apparatur zur Beprobung von LNG-Tankstellen abgeschlossen

Darüber hinaus wurden folgende DVGW-Forschungsprojekte in 2022 erfolgreich abgeschlossen:

- "H₂-BoMess Analyse zum Verhalten des Gasaustritts bei erdverlegten Leitungen mit wasserstoffhaltigen und wasserstoffreichen Gasen unter Berücksichtigung der G 465-1"
- "ANNeBEL Aufbau eines neuronalen Netzes für die Luftbildauswertung zur autonomen Überwachung von Erdgastransportleitungen"
- "EvaNeMeL Evaluierung neuartiger Messmethoden zur Leitungsüberprüfung in Gasnetzen"
- "BiOdor Erhaltung des Sicherheitsniveaus bei der Odorierung von Biogas – Identifikation und Entfernung von geruchsrelevanten Biogasbegleitstoffen"

1.6.5 Veranstaltungen

Gaskursus

Vom 28.-31.03.2022 fand der Gaskursus coronabedingt zum zweiten Mal als Online-Veranstaltung statt. 29 Personen haben an den 21 Vorträgen der Veranstaltung teilgenommen. In gewohnter Weise wurde durch das Grundwissen der Gasversorgung bis hin zu den aktuellen Fragestellungen und Innovationsthemen der Gaswirtschaft geführt.

63. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches

2022 konnte der 63. Erfahrungsaustausch erfreulicherweise wieder in Präsenz stattfinden. Mit großzügiger Unterstützung durch

die GASCADE Gastransport GmbH fand die Veranstaltung vom 28.-30.09.2022 im Renthof in Kassel statt. Insgesamt 70 Personen wurden Fachbeiträge zur Rolle von Gas bei der Energiewende und aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten präsentiert.

Im Anschluss an die Vorträge gab es eine spannende Führung im Bergpark Wilhelmshöhe und anschließend konnten sich alle Teilnehmenden beim gemeinsamen Abendessen im Renthof fachlich austauschen.

1.7 Veröffentlichungen im Jahr 2022 – EBI ceb

Zeitschriftenaufsätze

Eberhard, M. und Kolb, T.: IEA Bioenergy Agreement Task 33 – Country Report Germany 2021. IEA Bioenergy.

Graf, D.; Neuner, P. und Rauch, R.: Hydroprocessing and Blending of a Biomass-Based DTG-Gasoline. Energy Engineering 119 (6), S. 2169–2192, DOI: 10.32604/ee.2022.022759.

Graf, D.; Koroveshi, X.; Kolb, T. und Rauch, R.: Konzepte zur Integration erneuerbarer synthetischer Kraftstoffe in einen bestehenden Raffinerieverbund. Chemie Ingenieur Technik 90 (1), S. 267–280, DOI: 10.1002/cite.202100154.

Haas, M.; Fleck, S.; Böning, D.; Santo, U. und Kolb, T.: Entrained-Flow Gasification of Pyrolysis Oil – Influence of Flame Structure on Fuel Conversion. Chemie Ingenieur Technik 94 (9), S. 1294, DOI: 10.1002/cite.202255060.

Haas, M.; Dammann, M.; Fleck, S. und Kolb, T.: Entrained Flow Gasification: Impact of Fuel Spray Distribution on Reaction Zone Structure. Fuel, DOI: 10.1016/j. fuel.2022.126572.

Heneka, M.; Köppel, W.; Schlautmann, R.; Graf, F.; Sperlich, J.; Rau, C.; Hüttenrauch, J.; Lubenau, U.; Hoffmann, M.; Sökeland, H.; Bothe, D.; Heinz, L.; Blesinger, G. und Chavali, A.: H₂ im Gasnetz und die Interaktion mit Gasmotoren. energie | wasser-praxis (6-7), S. 56–68.

- Holl, E.; Müller, C.; Staudt, C.; Mörs, F.; Schütte, J.; Pratofiorito, G.; Pult, F.; Becker, S.; Geimer, M.; Wohlfahrt, F. und Pontzen, F.: Bereitstellung von methanbasierten Kraftstoffen aus biogenen Abfällen. gwf Gas+Energie (9), S. 60–73.
- Hongrapipat, J.; Rauch, R.; Pang, S.; Liplap, P.; Arjharn, W.; Messner, M.; Henrich, C.; Koch, M. und Hofbauer, H.: Co-Gasification of Refuse Derived Fuel and Wood Chips in the Nong Bua Dual Fluidised Bed Gasification Power Plant in Thailand. Energies 15 (19), S. 7363, DOI: 10.3390/en15197363.
- Horn, H.; Kolb, T. und Trimis, D.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2021. Engler-Bunte-Institut des KIT, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Forschungsstelle für Brandschutztechnik. gwf Gas+Energie; gwf-Abwasser/Wasser 163 (6,7,8; 6).
- Jakobs, T.; Wachter, S.; Haas, M.; Fleck, S. und Kolb, T.: Burner Development for High-Pressure Entrained-Flow Gasification. Chemie Ingenieur Technik 94 (9), S. 1215, DOI: 10.1002/cite.202255022.
- Kansy, M.; Neuner, P.; Bajohr, S.; Rauch, R. und Kolb, T.: Vergleich verschiedener Ansätze zur nachhaltigen Olefinproduktion nach dem MtO- und FT-Verfahren. Chemie Ingenieur Technik 61 (3), S. 172, DOI: 10.1002/cite.202200032.
- Kolb, T.; Eberhard, M.; Stapf, D. und Sauer, J.: CarbonCycleLab: Wasserstoff für die Circular Economy. Forschende des KIT arbeiten an einem Weg von Reststoffen zu neuen, hochwertigen Produkten. looKIT (1), S. 38–41.
- Kröger, K.; Schütz, J. und Graf, F.: Aktualisierung der DVGW-Geruchsmeldestatistik. energie | wasser-praxis (10), S. 70–77.
- Leiblein, J.; Mörs, F.; Graf, F. und Kolb, T.: Grundlagenforschung für die Dreiphasen-Methanisierung als Teil der Power-to-Gas-Prozesskette. energie | wasser-praxis (4), S. 54–58.
- Matthes, J.; Kollmer, M.; Eberhard, M.; Hagenmeyer, V. und Kolb, T.: A Highspeed-Camera Based Measurement System for the High-Pressure Entrained-Flow Gasification. Chemical Engineering & Technology, DOI: 10.1002/ ceat.202200434.
- Mörs, F.; Bär, K.; Leiblein, J.; Graf, F.; Lehnert, F. und Bäuerle, M.: DVGW-Leitprojekt "Roadmap Gas 2050" Teil 3: Potenziale und Bereitstellungsoptionen für erneuerbare Gase. energie | wasser-praxis (2), S. 36–41.
- Mörs, F.; Heneka, M.; Graf, F.; Bäuerle, M. und Benthin, J.: Zur Bewertung der THG-Emissionen von türkisem Wasserstoff: Entscheidend ist, was vorne reingeht! energie | wasser-praxis kompakt (Mai 2022), S. 8–9. Online verfügbar unter https://wvgw.de/dyn_pdf/ewp/2022/kompakt_Pyrolyse/8/.
- Neuner, P.; Graf, D.; Netsch, N.; Zeller, M.; Herrmann, T.-C.; Stapf, D. und Rauch, R.:
 Chemical Conversion of Fischer–Tropsch Waxes and Plastic Waste Pyrolysis
 Condensate to Lubricating Oil and Potential Steam Cracker Feedstocks.
 Reactions 3 (3), S. 352–373, DOI: 10.3390/reactions3030026.
- Sauerschell, S.; Bajohr, S. und Kolb, T. (2022): Methanation Pilot Plant with a Slurry Bubble Column Reactor. Setup and First Experimental Results. Energy & Fuels 36 (13), S. 7166–7176, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c00655.
- Wachter, S.; Jakobs, T. und Kolb, T.: Mass Flow Scaling of Gas-Assisted Coaxial Atomizers. Applied Sciences 12 (4), S. 1–12, DOI: 10.3390/app12042123.
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Wachter, S.; Jakobs, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Kolb, T.; Bockhorn, H. und Stapf, D.: Numerical Simulations of Air-Assisted Primary Atomization at Different Air-to-Liquid Injection Angles. International Journal of Multiphase Flow 812 (2), S. 104304, DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104304.

Hochschulschrift

- Nestler, F.: Dynamic Operation of Power-to-X Processes Demonstrated by Methanol Synthesis. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2022. DOI: 10.5445/IR/1000150267.
- **Ortloff, F.:** Separation of CO_2 from Biogas using Ionic Liquids. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2022. ISBN: 978-3-8439-5221-7.
- Schollenberger, D.: Anwendung von Wabenreaktoren für die Methanisierung bei Power-to-Gas-Prozessen. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2022. ISSN: 2366-9594.

Beiträge auf Konferenzen

- Graf, D.; Neuner, P. und Rauch, R.: Production of Low-Aromatic Light Blending Components by Hydroprocessing of Heavy Biomass-Based Gasoline, 3rd International Conference on Energy and Power (ICEP 2021), Chiang Mai, Thailand, 18.-20.11.2021, DOI 10.1063/5.0115566.
- Leiblein, J.; Bär, K.; Mörs, F.; Hotz, C. und Graf, F.: Techno-Economic Analysis of Green Hydrogen Production from Solar Energy in MENA and Transport to Central Europe. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2021. ISES Solar World Congress 2021 (virtual), International Solar Energy Society Freiburg, Germany. Online verfügbar unter http://proceedings.ises.org/ swc2021/swc2021-proceedings.pdf.
- Poppenborg, R.; Chlosta, M.; Ruf, J.; Hotz, C.; Düpmeier, C.; Kolb, T. und Hagenmeyer, V.: Energy Hub Gas: A Modular Setup for the Evaluation of Local Flexibility and Renewable Energy Carriers Provision. IEEE 10th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). Oshawa, ON, Canada, 10.08.2022 12.08.2022.
- Rosenstiel, A.; Vehse, M.; Peterssen, F.; Voglstätter, C.; Kolb, T.; Jordan, T.; Musonda, F. und Thrän, D.: Wasserstoff als zentraler Baustein der Sektorenkopplung.

 Jahrestagung 2021 des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien (FVEE):

 Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität von der Forschung in die Anwendung. Berlin, Deutschland, 10.-11.11.2021.

Vorträge

- Beerbaum, D.; Bernhardt, D.; Jakobs, T.; Beckmann, M. und Kolb, T.: Method for Calculating the Urea Release and Decomposition in the NOXOUT Process in the Context of a Live Optimization Approach. INFUB-13. Algarve, Portugal, 21.04.22.
- Dums, K.; Schwarzenthal, D.; Marques, M.; Deeg, H.-P.; Villforth, J.; Garbe, T.; Krämer, H.; Graf, D. und Rauch, R.: Synthetic Fuels: From Laboratory to the Road. 43rd International Vienna Motor Symposium 2022. Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik. Wien, Österreich, 29.04.2022.
- Hüsing, F. und Kolb, T.: Modelltechnische Beschreibung des Verdunstungsverhaltens von biogenem Pyrolyseöl anhand dessen Siedeline. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Energieverfahrenstechnik (EVT) und Gasreinigung (Gas). Dechema. Bamberg, Deutschland, 30.03.2022.
- Jakobs, T.; Wachter, S.; Haas, M.; Fleck, S. und Kolb, T.: Burner Development for High Pressure Entrained Flow Gasification. 13th ESBES Symposium, (Bio)Process Engineering – A Key to Sustainable Development, Dechema, Aachen, Deutschland, September 2022.
- Kolb, T.: Beitrag der Hochtemperaturtechnik zu den Zielen des European Green Deal. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Energieverfahrenstechnik (EVT) und Gasreinigung (Gas), Dechema, Bamberg, Deutschland, 31.03.2022.
- Kolb, T. und Bajohr, S.: Wasserstoff aus Erdgas-Pyrolyse Ein Verfahrensvergleich. DVGW Technikforum Wasserstoff. online, 24.05.2022.
- Kolb, T.: Contribution of High-Temperature Process Technology to the Goals of the European Green Deal. 13th ESBES Symposium, (Bio)Process Engineering – A Key to Sustainable Development, Dechema, Aachen, Deutschland, 14.09.2022.
- Poppenborg, R.; Chlosta, M.; Ruf, J.; Hotz, C.; Düpmeier, C.; Kolb, T. und Hagenmeyer, V.: Energy Hub Gas: A Modular Setup for the Evaluation of Local Flexibility and Renewable Energy Carriers Provision. 10th International Conference on Smart Energy Grid Engineering, IEEE, Ontario, Canada, 10.08.2022.
- Stegmaier, T.; Kussin, P.; Mörs, F.; Graf, T. und Kolb, T.: Ionic Liquid-Based CO₂ Absorption Technology for Direct Air Capture. 19th International Conference on Carbon Dioxide Utilization (ICCDU) 2022. Princeton University, New Jersey, USA, 29.06.2022.
- Zimmerlin, B.; Eberhard, M.; Dahmen, N.; Lam, H.; Mai, R.; Michelfelder, B.; Niebel, A.; Otto, T.; Willy, M.; Kolb, T.; Sauer, J. und Stapf, D.: Operations of the Bioliq® Pilot Plant Entrained Flow Gasification in 5 MW Pilot Scale. 2nd Workshop Waste2H2, KIT Karlsruhe, Germany, 19.09.2022.

2. Verbrennungstechnik, DVGW-Forschungsstelle und Prüflaboratorium Gas, und Forschungsstelle für Brandschutztechnik

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

2.1 Lehre und Forschung

Im Jahr 2022 konzentrierte sich das Teilinstitut für Verbrennungstechnik auf Forschungsthemen rund um die flexible Bereitstellung von Energie und arbeitete an bereits etablierten Forschungsgebieten sowie an neuen Themen. Eine Vielzahl von Untersuchungen wurden durchgeführt, darunter zur Energiespeicherung und -umwandlung, zur Rußbildung, zu Verbrennungstechnik in stationären und Flugzeuggasturbinen sowie für die grundlegende Beschreibung von Verbrennungsvorgängen durch numerische Simulation. Der ehemalige Leiter Prof. Bockhorn war an einigen dieser Untersuchungen beteiligt.

Die allgemeine Ausrichtung der Forschung am Teilinstitut ist auf die Notwendigkeit ausgerichtet, weitgehend auf kohlenstoffhaltige Energieträger zu verzichten. Stattdessen konzentriert sich die Forschung auf kohlenstofffreie und alternative Energieträger wie Metalle, Schwefel, Rest- und Abfallströme kohlenstoffhaltiger Prozessgase sowie Wasserstoff und Wasserstoffbeimischungen vor folgendem Hintergrund:

- In Bezug auf die Sicherung der Energieversorgung wird die Verbrennung weiterhin in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung präsent sein, insbesondere im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien, alternativen Kraftstoffen, Speicherung und effizienter Nutzung von Energie sowie deren Bereitstellung und Verteilung. Eine schnelle und präzise Steuerung und intelligente Vernetzung ist notwendig, um deren Nutzung trotz schwankender Verfügbarkeit zu ermöglichen.
- Der Nachhaltigkeitsaspekt wird durch die Nutzung von alternativen und erneuerbaren Energiequellen verstärkt in die Prozesse der Fertigungsindustrie Einzug halten, was große Auswirkungen auf die Sicherstellung der Produktqualität hat. Daher müssen die Anforderungen an die Energieeffizienz im Herstellungsprozess und die exakte Steuerbarkeit aller beteiligten Teilprozesse erhöht werden.
- Die kontinuierliche Energieversorgung erfordert einen Fokus auf die gesamte Systemtechnik, wodurch interdisziplinäre Zusammenarbeit und Verbundforschung, insbesondere mit den Materialwissenschaften, an Bedeutung gewinnen. Sowohl experimentelle als auch numerische Methoden sind wichtig, um komplexe und multiskalige Prozesse genau zu modellieren und numerisch zu simulieren, wobei die Erhöhung der Rechenleistung eine immer genauere Modellierung ermöglicht.

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 Thermofluiddynamik" 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 waren wieder viele Studierende während ihres Studiums auch an den Forschungsaktivitäten des Teilinstituts beteiligt. Trotz der Herausforderungen durch die Pandemie auch im Jahr 2022 wurden sechs Bachelor- und vier Masterarbeiten abgeschlossen.

Professor Nikolaos Zarzalis ist zum 01. April 2022 in seinen verdienten Ruhestand getreten, der nur durch verschiedene verbliebene Aktivitäten in Zusammenhang mit der Betreuung von Promotionen unterbrochen wird. Im Jahr 2022 wurde dann auch das Berufungsverfahren für die Professur "Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme" mit der Berufung von Prof. Dr. Oliver Stein erfolgreich abgeschlossen. Die Professur tritt nach einer Neuwidmung die Nachfolge der bisherigen Professur "Angewandte Verbrennungstechnik" von Prof. Dr. Nikolaos Zarzalis an. Herr Prof. Stein hat seine Arbeit zum 01.12.2022 aufgenommen.

2.2 Laufende Forschungsarbeiten im Bereich Verbrennungstechnik

Die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Verbrennungstechnik konzentriert sich auf Problemstellungen, die sich in Zusammenhang mit der für die Speicherung und Bereitstellung von Energie aus nachwachsenden und fossilen Rohstoffen ergeben, auf eine Reduktion der Entstehung von Schadstoffen bei der Verbrennung 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

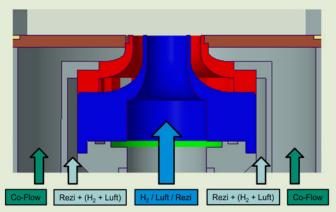


Bild 2.1: Brennerkonzept für die Verbrennung von Wasserstoff bei hohen Rezirkulationsraten.

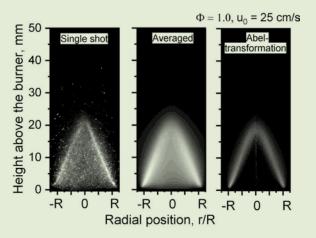


Bild 2.3: Eisenpulver-Flamme: Einzelbild, gemittelt und Abel-transformiert; Luftgeschwindigkeit von 25 cm/s, 1.86 kg-Luft/kg-Eisen.

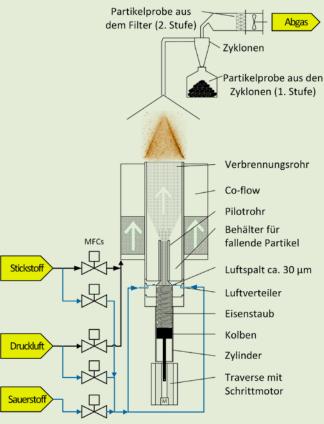


Bild 2.2: Rohrbrenner für Metall-Pulverflammen mit spezieller Partikelzuführung.

Alternativen zum Einsatz von fossilen Brennstoffen, zu der energetischen Verwertung von Biomasse 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.

Für eine erfolgreiche Transition zu einer umfassenden Wasserstoffwirtschaft ist es erforderlich, auch die sichere Verbrennung von Wasserstoff-Luft Flammen zu ermöglichen. Ein Projekt in diesem Zusammenhang wird durch die Friedrich und Elisabeth Boysen Stiftung für Forschung und Innovation gefördert. Der Titel des Projekts lautet "Vorgemischte Wasserstoff-Verbrennung bei hohen Rezirkulationsraten" und wird unter dem Kürzel (BOY-178) geführt. In diesem Innovationsprojekt soll eine stabile Verbrennung für vorgemischte Wasserstoff-Luft-Flammen durch intelligente Strömungsführung (Rezirkulation) erreicht werden. Außerdem soll die Reaktionszone über einen vergrößerten Bereich gestreckt werden, um vor allem in industriellen Anwendungen, eine gleichmäßigere Wärmeübertragung durch die

zugemischten Abgase zu erreichen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde bereits ein Modellbrenner entwickelt (**Bild 2.1**), welcher es ermöglicht, die erzeugte Flamme parametrisch hinsichtlich Vormischung, Rezirkulationsrate und Verbrennungsstufung zu untersuchen. Anhand dieser Grundlagenuntersuchungen werden im Weiteren Mischungs- und Verbrennungskonzepte abgeleitet, die eine ebenso sichere vorgemischte Wasserstoff-Verbrennung ermöglichen, wie sie mit Brennertechnologien für konventionelle Kohlenwasserstoffe möglich sind. Neben der Stabilisierung und Streckung des Verbrennungsprozesses steht außerdem eine Minimierung der Stickoxid-Emissionen im Fokus.

Um die Nutzung eines hohen Anteils an regenerativen Energiequellen zu ermöglichen, sind quantitativ stark vergrößerte Energiespeichermöglichkeiten erforderlich, die insbesondere auch durch chemische Energieträger bereitgestellt werden können. Innerhalb des Forschungsprojektes "Clean Circles", an dem insgesamt 22 Forschungsgruppen der Technischen Universität Darmstadt, der Hochschule Darmstadt, der Universität Mainz, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie dem DLR Institut für CO₂-arme Industrieprozesse in Cottbus (DLR: Deutsches

Zentrum für Luft und Raumfahrt) beteiligt sind, wird daher ein kohlenstofffreier Energiezyklus erforscht, in dem elementares Eisen als Energieträger dient. Eisenpulver kann z. B. in Kraftwerken statt Kohlestaub verbrannt werden. Das entstehende Eisenoxid-Pulver lässt sich danach mithilfe von regenerativ erzeugtem Wasserstoff wieder zu Eisen reduzieren. Die Vorteile dieses Kreislaufes liegen in der hohen Energiedichte, sicheren Lagerung und günstigen Frachtkosten von Eisen- und Eisenoxidpulver.

Der experimentelle Beitrag des Teilinstituts Verbrennungstechnik zum Projekt unter Prof. Trimis ist die Grundlagenforschung der Eisenpulververbrennung, insbesondere die Bestimmung der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit. Zu diesem Zweck wurde ein Rohrbrenner mit spezieller Partikelzuführung weiterentwickelt (Bild 2.2). Die Eisenpartikel werden über einen Kolben zugeführt und durch hohe Luftgeschwindigkeiten über einen Ringspalt mit ca. 30 µm und optimierter Strömungsführung stetig abgetragen. Danach wird die partikelbeladene Strömung im Brennerrohr verlangsamt. Eine Herausforderung ist dabei, dass bei den niedrigen Geschwindigkeiten an den Wänden Ablagerungen entstehen, die beim Herabfallen zu starken Schwankungen der Partikelzufuhr führen. Diese Problematik konnte durch das eingesetzte Pilotrohr und den darum entstehenden Behälter für herabfallende Partikel gelöst werden. Die so erzeugte, stetige Partikelzuführung ermöglicht die Untersuchung von reinen Eisen-Flammen auch ohne Luftvorwärmung (Bild 2.3). Die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit von Carbonyl-Eisenpulver mit einem mittleren Sauter Durchmesser von ca. 13 µm beträgt ca. 14 cm/s und ist im untersuchten Bereich unabhängig vom Äquivalenzverhältnis (Bild 2.4). Im nächsten Arbeitsschritt wird der Einfluss von mehreren Parametern wie Luftvorwärmung, Luftzahl und Partikelgröße auf die Flammenpropagation ermittelt werden. Ein weiteres Forschungsgebiet umfasst die Auswirkung von Turbulenz auf die Verbrennungsgeschwindigkeit. Aktuelle numerische Forschungsarbeiten im Rahmen von Clean Circles wurden gegen Ende des Jahres 2022 unter der Leitung von Prof. Stein begonnen und befassen sich mit fundamentalen Analysen der Eisenpartikelzündung und -verbrennung in turbulenten Strömungen mittels der sog. Direkten Numerischen Simulation der Trägerphase (carrier-phase DNS).

Im Rahmen des Forschungsprojektes CHAIRLIFT (Compact Helical Arranged combustors with lean LIFTed flames), das im Rahmen der "Clean Sky 2" Programms unter Fördernummer 831881 im europäischen Förderprogramm Horizon 2020 gefördert wurde, wurde die Kombination aus abgehoben brennenden Sprayflammen mit einer geneigten Brenneranordnung für die Anwendung in Ringbrennkammern für Flugzeugtriebwerke untersucht. Eine geneigte Brenneranordnung ermöglicht kompaktere Brennkammern und weist ein für die nachfolgenden Leitschaufeln vorteilhaftes Geschwindigkeitsprofil auf. Durch die abgehoben brennenden Sprayflammen und damit verbundene Vormischung sollen sehr niedrige Stickoxidemissionen erreicht werden.

Die Aufgabe des Engler-Bunte-Instituts, Verbrennungstechnik, war die experimentelle Untersuchung anhand einer Modellbrennkammer mit fünf Brennern (Bild 2.5). Die Neigung der

Brenner in einer Ringbrennkammer entspricht dabei einem axialen Versatz der Brenner in der Modellbrennkammer. Die Versuchsanlage wurde bei bis zu 340 kW Leistung und einer Leistungsdichte von bis zu 34 MW/m³ bei atmosphärischem Brennkammerdruck betrieben. Für die Brennerkonfiguration mit und ohne Neigung wurden insgesamt sehr niedrige Stickoxidemissionen erreicht (Bild 2.6). Die Konfiguration mit Neigung (20°) weist niedrigere Stickoxidemissionen als die Version ohne Neigung auf. Die mageren Verlöschgrenzen sinken mit erhöhtem Neigungswinkel der Brenner (Bild 2.7). Insgesamt wird eine hervorragende Kombination aus guter Stabilität und geringen Stickoxidemissionen für die gezeigten Konfigurationen erreicht.

Die TU Darmstadt und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bearbeiten gemeinsam den Sonderforschungsbereich Transregio 150 "Turbulente, chemisch reagierende Mehrphasenströmung in Wandnähe". Am Teilinstitut Verbrennungstechnik wird darin die Wechselwirkung zwischen dem Transport skalarer Größen und der Turbulenz an Wänden experimentell untersucht. Die Versuchsanordnung besteht aus einer Düse, die mittig durch eine Trennwand geteilt ist. Die dadurch entstehenden zwei getrennten Ströme breiten sich eine gewisse Strecke nach dem Düsenaustritt in Richtung einer senkrecht zur Strömungsrichtung stehenden Wand aus und interagieren untereinander sowie mit der Wand. Dabei kann insbesondere der Transport von Impuls und Skalaren für verschiedene Randbedingungen an der Wand untersucht und klassifiziert werden (Bilder 2.8 und 2.9). Das übergeordnete wissenschaftliche Ziel der Untersuchungen bezog sich in den bisherigen Arbeiten auf generische motor- und abgasanlagenrelevante Strömungskonfigurationen. Die zweite Förderperiode des Transregios wurde in 2022 abgeschlossen und erfolgreich begutachtet. Auf Basis dieser Begutachtung wurde in 2022 eine dritte Förderperiode genehmigt und startet 2023 mit dem zusätzlichen Leitbeispiel "Flammensicherheit", das auf die erzielten Ergebnisse der vorherigen Förderperiode aufbaut.

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 2022 wurde am Teilinstitut Verbrennungstechnik eine Dissertation abgeschlossen. Einen Überblick über das zugehörige Forschungsthema gibt die im Folgenden aufgeführte kurze Zusammenfassung der Arbeit:

Thomas von Langenthal: Experimentelle Untersuchung der Rußentstehung innerhalb des fett-mageren Verbrennungskonzepts und dem Einsatz von Kerosin.

(Prof. Dr. N. Zarzalis, Prof. Dr. R. Suntz)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Rußentstehung in der Primärzone einer mit Kerosin betriebenen Fett-/Mager-Brennkammer unter für Flugtriebwerke relevanten Bedingungen untersucht. Ziel war es dabei, die Rußentstehung unter – für Fluggasturbinen typischen Bedingungen (hohe Lufttemperatur, hohe

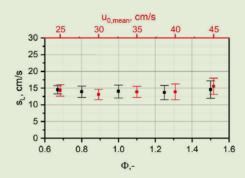


Bild 2.4: Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit von Carbonyleisenpulver mit einem mittleren Sauter-Durchmesser von 13 μ m und einer Luft-Einlasstemperatur von 20 °C.

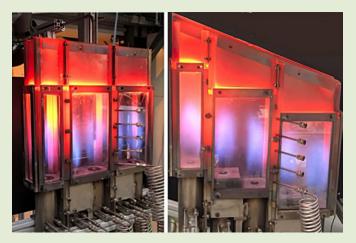


Bild 2.5: Modularer Multi-Brennerprüfstand mit variierten axialen Brenner-Versatz bzw. entsprechenden Neigungswinkel (0° und 20°).

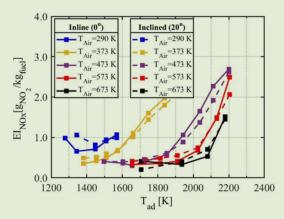


Bild 2.6: Stickoxid-Emissionsindex in Abhängigkeit der adiabaten Flammentemperatur bei variierter Lufteinlasstemperatur (Brennstoff: JET-A1), relative Druckdifferenz 3 %.

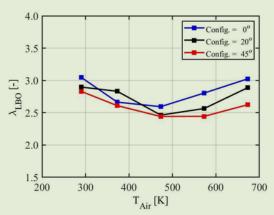


Bild 2.7: Magere Verlöschgrenzen mit variierten Neigungswinkel.

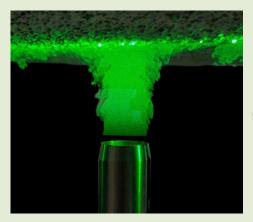
spezifische Leistung, flüssiger Brennstoff) – zu untersuchen, um die zu Grunde liegenden Prozesse besser zu verstehen. Die Entwicklung moderner Flugantriebe ist heute ohne CFD-Simulationen und Verbrennungsmodellierung nicht mehr denkbar. Um Ruß-Modelle zur Vorhersage von Rußemissionen entwickeln zu können, müssen diese mithilfe von experimentellen Daten validiert werden. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es daher auch, Validierungsdaten für Ruß-Simulationen unter realitätsnahen Bedingungen zu generieren.

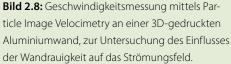
Hierfür wurden einerseits zunächst Voruntersuchungen an einer vorgemischten, laminaren, eindimensionalen Flachflamme durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Brennstoffe und des Äquivalenzverhältnisses auf die Rußbildung zu ermitteln und um die Rußgrenzen des verwendeten Kerosins zu bestimmen, sowie eine Brennkammer konstruiert (Bild 2.10) und ein passender Versuchsstand aufgebaut. Neben einem Augenmerk auf realistische Randbedingungen wie Eintrittsgeschwindigkeit, Lufttemperatur und geometrischen Abmessungen, war die Zugänglichkeit für optische sowie invasive Messungen wichtig. Die untersuchte Brennkammer wurde mit einem Drallbrenner mit Kerosin betrieben, konnte Luftvorwärmtemperaturen von bis zu 700 K erreichen und hatte je nach Betriebspunkt eine thermi-

sche Leistung von bis zu 130 kW. Der optische Zugang war von allen Seiten möglich und Proben für invasive Messungen konnten über die Abgasseite in die Brennkammer eingeführt werden.

Die Untersuchungen begannen mit der Messung des Strömungsfelds ohne Verbrennung mittels PIV (Particle Image Velocimetry), wobei diese Ergebnisse zeigten, dass die versetzte Anordnung der Sekundärluftzugänge zu einem nicht symmetrischen Strömungsfeld führen. Diese Asymmetrie beschränkt sich nicht nur auf den Bereich der Sekundärluftbeimischung, sondern ist auch in der Primärzone sichtbar. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass Teile der Sekundärluft in die innere Rezirkulationszone transportiert werden.

Erste Verbrennungsversuche zeigten dann, dass in dem untersuchten Aufbau für bestimmte Betriebspunkte zwei unterschiedliche Flammentypen stabilisiert werden können (Bild 2.11). So kann die Flamme sowohl abgehoben als auch am Brenner ankernd brennen. Die abgehobenen Flammen können durch Abmagern der Mischung zu ankernden Flammen umschlagen. Einmal umgeschlagen verblieben die Flammen in diesem Zustand und heben auch bei einer Erhöhung des Brennstoffanteils des Gemischs nicht wieder ab. Das Abheben der Flamme





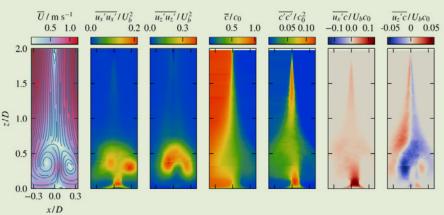


Bild 2.9: Simultane Geschwindigkeits- und Tracerkonzentrationsmessungen der aufprallenden, turbulenten Scherschicht. Hierbei sind die Mittelwerte, die Schwankungswerte und die Korrelationen zwischen Geschwindigkeit und Stoffkonzentration dargestellt.

lässt sich zusätzlich durch den Piloten steuern. Ein Ausschalten des Pilot-Brennstoffs führt zu einem Abheben der Flamme.

Die Untersuchungen der reagierenden Strömung mit PIV zeigten, dass sich die Flammentypen auch im mittleren Strömungsfeld unterscheiden (Bild 2.12). Im Fall der abgehobenen Flammen öffnet sich der Strömungskegel über dem Brenner nicht ganz so weit und die Geschwindigkeiten in der inneren Rezirkulationszone sind höher. Das Rückströmen von Sekundärluft in die Primärzone – wie in der isothermen Strömung beobachtet – ist hier nicht zu sehen. Im Gegensatz dazu ist bei den ankernden Flammen zu erkennen, dass Teile der Sekundärluft in die Primärzone der Brennkammer transportiert werden. Eine Untersuchung der Strömung in unterschiedlichen Messebenen zeigte, dass das gesamte Strömungsfeld aufgrund der Art der Sekundärlufteindüsung und der komplexen Interaktion der verdrallten Hauptströmung mit der Sekundärluft asymmetrisch ist und dass der beobachtete Transport von Sekundärluft in die innere Rezirkulation auf die mittleren Messebenen beschränkt ist.

Um die Interaktion des Kerosinsprays mit der Gasströmung besser zu untersuchen, wurde eine neue Methode zum Auswerten der PIV-Aufnahmen entwickelt. Mit dieser konnten die Geschwindigkeiten von Kerosintropfen und Gasströmung unabhängig voneinander bestimmt werden. Die Messungen zeigten, dass das Kerosin-Spray des Piloten vor allem in den inneren Bereich der Rezirkulationszone transportiert wird und dass die Pilot-Luft wenig mit diesem Spray interagiert. Dies ist eine wichtige Beobachtung, um das Auftreten der unterschiedlichen Flammentypen erklären zu können. Da das Gemisch in der Primärzone einen Brennstoffüberschuss hat, enthalten die rezirkulierten Abgase in der Regel keinen Sauerstoff. Erst das Zirkulieren der Sekundärluft in die Primärzone erlaubt daher das Zünden des Piloten. In den PIV-Aufnahmen der gesamten Strömung sind immer wieder zeitlich begrenzte Ereignisse zu beobachten in

denen Sekundärluft in die Primärzone transportiert wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Transport einer ausreichend großen Menge unverbrannter Luft in die Primärzone das Zünden des Piloten und damit den Flammenumschlag ermöglicht. Die Zweiphasen-PIV-Messungen zeigten zusätzlich, dass es zu sehr hohen Differenzgeschwindigkeiten zwischen der Gasund der Flüssigphase kommen kann und dass es je nach Flammentyp zu unterschiedlichen Geschwindigkeitsfluktuationen im Spray kommt.

Temperaturen und lokale Spezieskonzentrationen wurden in der Brennkammer durch Einführen entsprechender Sonden in den Brennraum gemessen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Temperaturverteilung der Primärzone relativ konstant ist und dass es in der Sekundärzone – mit Ausnahme eines Hotspots – zu einer schnellen Abkühlung des Gemischs kommt. Messungen von Sauerstoff im Bereich der inneren Rezirkulation bestätigten die Beobachtung aus den PIV-Messungen.

Messungen des lokalen Rußvolumenbruchs mittels LII (Laserinduzierte Inkandeszenz) wurden im Bereich der primären Verbrennungszone durchgeführt. Für die ankernden Flammen wurde in allen untersuchten Betriebspunkten sehr intermittierendes Rußvorkommen festgestellt. Außerdem konnte eine starke Abhängigkeit der Rußentstehung vom Kerosinspray beobachtet werden.

In den abgehobenen Flammen war in den gleichen Betriebspunkten kein Ruß messbar. Dies war erst bei deutlich brennstoffreicheren Gemischen der Fall. In diesen Flammen war das Ruß-Verhalten nicht intermittierend und unabhängig vom Spray. Ruß wurde vor allem in der äußeren Rezirkulation gemessen.

Ein Vergleich der maximalen Rußvolumenbrüche der abgehobenen Flammen mit Messwerten des Rußvolumenbruchs in vorgemischten, eindimensionalen Flachflammen zeigt, dass die Rußgrenze und die gemessenen maximalen Rußvolumenbrüche ähnlich sind.

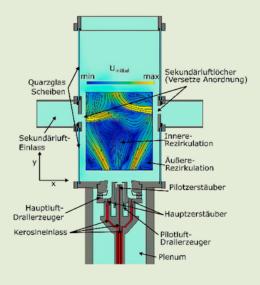


Bild 2.10: Brennkammer mit Brenner sowie Stromlinien eines typischen Geschwindigkeitsfeldes.

Bild 2.11: Fotografien der unterschiedlichen Flammentypen. Links vor Umschlag - Rechts nach Umschlag.



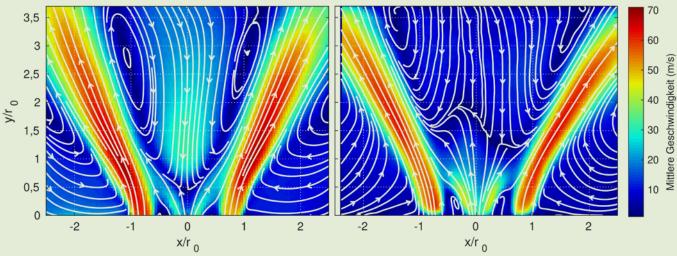


Bild 2.12: Mittlere Strömungsfelder bei $\phi_D = 1,43$ und TL = 600 K: Ankernde (links) und abgehobene Flamme (rechts).

Mittels zeitaufgelöster zwei-Farben-LII wurden die Größe der Ruß-Primärpartikel in der Primärzone der Brennkammer gemessen. Wie auch bei den Messungen des Volumenbruchs wurden hier ausgeprägte Unterschiede zwischen den ankernden und den abgehobenen Flammen deutlich. Die gemessenen mittleren Partikeldurchmesser sind in den ankernden Flammen signifikant höher als in den abgehobenen Flammen.

Partikelgrößen wurden ebenfalls am Auslass der Brennkammer gemessen (Bild 2.13). Vergleicht man abgehobene und ankernde Flammen im gleichen Betriebspunkt, wurden bei den abgehobenen Flammen kleinere und deutlich weniger Rußpartikel am Brennkammerauslass gemessen als bei den ankernden Flammen.

2.4 Forschungsstelle für Brandschutztechnik

IMK-Themen

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik ist u. a. von den Ländern (IMK: Innenministerkonferenz der Länder) beauftragt, anwendernahe Forschung für die Feuerwehren durchzuführen. Im Jahre 2022 wurde dazu ein Forschungsbericht fertiggestellt und veröffentlicht.

 Nr. 213: Zeh, K.; Dinkov, I.; Weiser, P. "Unterventilierte Realbrände - Experimentelle Untersuchungen zu Wohnungsbränden bei Luftmangel"

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

2022 wurde an der Landesfeuerwehrschule BaWü Unterricht für die Lehrgangsteilnehmer des höheren und gehobenen Dienstes

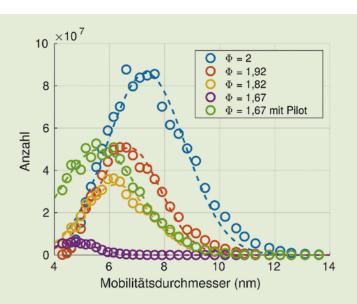


Bild 2.13: Gemittelte SMPS Messergebnisse am Brennkammeraustritt (Symbole) mit gefitteter Gaußverteilung (Linien).

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.

Ertüchtigung eines kommerziellen CFD-Programmes – Teil 2 (2022-2023)

Das Ziel des IMK-Forschungsprojektes ist die Simulation der für feuerwehrspezifische Zwecke relevanten Flammeneigenschaften von Poolfeuern oder Raumbränden und die anschließende Vereinfachung der Flammensimulationen, so dass der zeitliche Aufwand geringer ausfällt als bei der detaillierten Simulation der Flamme, trotzdem aber kein inakzeptabel hoher Fehler aufgrund der Vereinfachung auftritt.

Im zweiten Arbeitsschritt im Jahr 2022-2023 wird die im Teil I erstellte Referenzkombination an Modellen und numerischen Einstellungen für die dreidimensionale numerische Berechnung von brandlast- sowie ventilationsgesteuerte Brandszenarien optimiert und verwendet. Wichtige Brandeigenschaft ist die stochastische, in der Regel instationäre Änderung der Brandfläche (Brandausbreitung) und Brandleistung. Während sich bei geringen thermischen Leistungen ein praktisch stationärer Brand ausbilden kann, variiert die Brandleistung intermittierend, da ventilationskontrolliert, bei gleicher Öffnungsgröße und größerer Brandleistung. Relevant für die Überprüfung der Brandsicherheit von Gebäuden ist die Simulation eines parametrisierten Brandverlaufs. Um dies mit dem kommerziellen CFD Tool Ansys CFX berechnen zu können, wird in einem ersten Schritt eine Brandleistungskurve bei einer gegebenen konstanten Eintrittsfläche in den Solver implementiert und berechnet. In einem zweiten Schritt wird auch die Möglichkeit zur Eingabe einer zeitlichen und räumlichen Änderung der Grundfläche (in den beiden horizontalen Raumrichtungen) des Brandes implementiert. Abschließend wird die realitätstreue Simulation eines ventilationsgesteuerten Brandes angestrebt. Um dies zu ermöglichen, sollen vereinfachte Modelle zur Flammenlöschung (bei Sauerstoffmangel) entwickelt implementiert und angewandt werden.

Studie zur Brandbekämpfung mit Wassernebel-Löschanlagen (2022-2023)

Durch neue Brandrisiken wie z.B. geschlossene dynamische Lagersysteme (wie z. B. Vertikalliftsysteme) mit extrem hohen flächenbezogenen Brandlasten sowie dem zunehmenden Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen und stationären Speichern (z. B. geplante weltweit größte Netzstabilisationsanlage der TransnetBW in Kupferzell, 250 MWh) kommt der Brandbekämpfung bzw. Hemmung der Brandausbreitung und der Reduktion der giftigen Schadstoffe (Rauchgaswäsche!) eine immer größere Bedeutung zu.

In der Studie zum IMK-Forschungsprojekt wird unter Einbeziehung von an der FFB durchgeführten Versuchen ermittelt, welche Einsatzmöglichkeiten aber auch Grenzen von Wasserlöschanlagen (Sprinkler, Sprühwasser- und Hochdruckwassernebelanlagen) vorliegen.

Wasserstoff im Erdgasnetz – Relevanz für bestehende Brandschutzmaßnahmen

Besonders im Hinblick auf die Klimaziele der Bundesregierung sind Mischungen aus Wasserstoff und Erdgas interessant, da bei der energetischen Nutzung des Wasserstoffs keine CO₂-Emissionen anfallen. Zudem lässt sich Wasserstoff durch Power-to-Gas-Technologien klimaneutral herstellen. Dadurch kann zeitweise überschüssiger erneuerbarer Strom mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt und im Gasnetz gespeichert werden. Die Beimischung kann als schnelle Lösung zur Dekarbonisierung des Wärmesektors gesehen werden. Gegenwärtig ist eine Zumischung von bis zu 10 % Wasserstoff in das Erdgasnetz zulässig und höhere Prozentsätze werden bereits untersucht [1]. Erste Untersuchungen des DVGW zeigen, dass eine Beimischung von bis zu 30 % realisiert werden kann [2].

Durch die Beimischung des Wasserstoffs ändern sich die Eigenschaften von Erdgasflammen, die vereinfacht als Methanflammen angesehen werden können. Neben der höheren adiabaten Verbrennungstemperatur weist Wasserstoff im Vergleich zu Methan auch eine um das 6-fache höhere Flammengeschwindigkeit auf. Diese Erhöhung führt zu einer möglichen Änderung der Flammenposition und deren Stabilität. Die Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz führt des Weiteren zu einer Änderung der Wärmeabgabe verglichen mit reinen Methanflammen, hervorgerufen durch die spektralen Eigenschaften des Wasserstoffs. Diese Veränderungen machen eine (experimentelle) Neubetrachtung der verbrennungstechnisch sowie sicherheits- und brandschutztechnisch relevanten Aspekte notwendig.

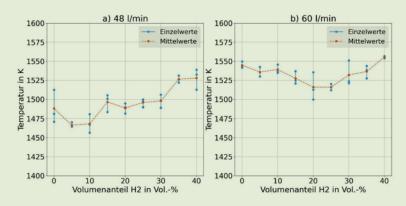


Bild 2.14: Maximaltemperaturen über den Volumenanteil von Wasserstoff bei a) 48 l/min und b) 60 l/min.

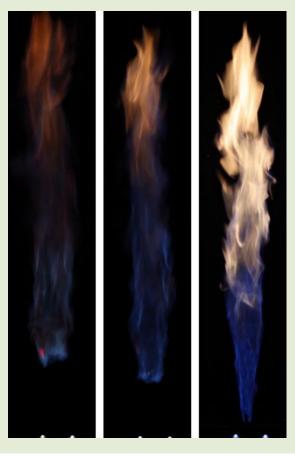


Bild 2.15: Bilder der Flammen bei verschiedenen Wasserstoffanteilen (v. l. n. r.: 0, 20, 40 Vol.-%; 60 l/min).

In vorangegangenen Studien wurden hauptsächlich die Auswirkung der Wasserstoffzugabe auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften in verschiedenen Brennersystemen untersucht. Dabei wurden zum Großteil laminare Vormischflammen betrachtet [3, 4, 5]. Im Bereich der turbulenten Diffusionsflammen wurden zum jetzigen Kenntnisstand lediglich vereinzelt Grundlagenstudien durchgeführt [6, 7]. Die vorhandenen Studien fokussierten sich hierbei jedoch auf die technischen Endanwendungen. Die betrachtete Literatur zeigt keinerlei Forschung zu den sicherheits- und brandschutztechnischen Aspekten von Methan-Wasserstoff-Mischungen.

Eine im Jahr 2022 durchgeführte Studie der Forschungsstelle für Brandschutztechnik unterscheidet sich von bisherigen Untersuchungen dahingehend, dass diese möglichst realitätsnahe Untersuchungen enthält. Mit dem Hintergrund einer anwendungsbezogenen und sicherheitstechnisch relevanten Betrachtung der Wasserstoffbeimischung in das Erdgasnetz, wurde ein Versuchsstand ausgelegt und aufgebaut, mit welchem verschiedene Eigenschaften von Methan-Wasserstoff-Flammen untersucht werden können.

Grundsätzlich soll der Versuchstand eine Leckage in einer haushaltsüblichen Gasleitung simulieren, wobei bei dem allerersten Versuchsstandsaufbau eine Edelstahlplatte an dem Brenner ersatzweise ein 1 Zoll Rohr mit einer Wandstärke von 3 mm übernimmt. Dadurch ergibt sich, dass die Edelstahlplatte 3 mm stark ist und die Breite dem halben Umfang des Rohres entspricht. Die Breite wurde so ausgewählt, dass hinsichtlich der Wärmeübertragung und vor allem der -ableitung eine äquivalente Fläche vorhanden ist. Der Volumenstrom an Brenngas kann frei variiert werden, jedoch kommt es bei zu hohen Volumenströmen zum Abblasen der Flamme.

Mit der verwendeten Versuchsanordnung bildete sich eine abgehobene, turbulente Diffusionsflamme aus. Hierbei fällt auf, dass die Abhebehöhe sich in Abhängigkeit von der Wasserstoffzumischung verändert.

Im Verlauf der experimentellen Untersuchungen wurden verschiedene verbrennungstechnische Eigenschaften wie Flammenlänge und -temperatur untersucht, wobei primär die Auswirkung der Wasserstoffbeimischung betrachtet wurden. Die Untersuchungen wurden hier jeweils bei Volumenströmen von 48 l/min und 60 l/min, sowie den Wasserstoffkonzentrationen im Bereich zwischen 0 Vol.-% und 40 Vol.-% durchgeführt.

In Bild 2.14 sind die maximalen Temperaturen der Flamme über den Volumenanteil an Wasserstoff, für den jeweiligen Volumenstrom, dargestellt. Dabei sind die Maximaltemperaturen der drei durchgeführten Messungen jeder Wasserstoffkonzentration in Blau und der Mittelwert dieser in Orange aufgezeichnet. Auffällig ist, dass die Maximaltemperatur im Mittel bei beiden Volumenströmen zunächst sinkt und dann wieder ansteigt.

Bild 2.15 zeigt Momentaufnahmen von drei unterschiedlichen H₂-Konzentrationen. Deutlich erkennbar ist die Änderung der Abhebehöhe, sowie die Struktur und Färbung der Flammen

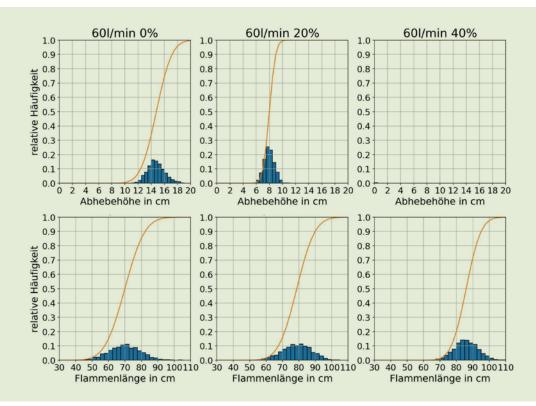


Bild 2.16: Verteilung der Flammenlänge und Abhebehöhe bei 60 l/min bei verschiedenen Wasserstoffanteilen

als Folge der Wasserstoffbeimischung. Zur Ergänzung der Messungen mit Thermoelementen und Wärmeflussaufnehmern wurden bildgebende Methoden eingesetzt, um die Abhebehöhe und auch die Flammenlänge zu bestimmen. Dabei wurden Videos der verschiedenen Flammen aufgenommen und daraus 3.000 Bilder, mithilfe eines in MATLAB implementierten Algorithmus, ausgewertet. Dafür wurden die eingelesenen Bilder zunächst in Graustufenbilder umgewandelt und mithilfe des Sobel-Gradienten ein Binärcode der Flamme erstellt. Unter Zuhilfenahme der Referenzlänge kann folglich die Abhebehöhe und Flammenlänge aus dem Binärbild bestimmt werden [8]. Die ermittelten Werte wurden anschließend in einer Verteilung dargestellt (Bild 2.16). Dabei war auffällig, dass eine Erhöhung des Wasserstoffanteils zu einer geringeren Verteilungsbreite führt. Bei Betrachtung der Flammenlänge hat sich die Verteilung mit steigendem Wasserstoffanteil in Richtung größerer Werte verschoben, während bei der Abhebehöhe der gegenteilige Trend beobachtet wurde.

Die geringere Abhebehöhe aufgrund der Wasserstoffbeimischung resultiert aus der höheren Brenn- sowie Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserstoffs [9, 10]. Aufgrund der steigenden Brenngeschwindigkeit wurde eine Verkürzung der Flamme mit zunehmendem Wasserstoffanteil erwartet. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Flammenlänge im hier untersuchten Konzentrationsbereich von Wasserstoff zunimmt. Dies resultiert daraus, dass die Abnahme der Gesamtlänge von Düse bis Flammenspitze geringer ist als die Abnahme der Abhebehöhe. Bei einer weiteren Erhöhung des Wasserstoffanteils über die untersuchten 40 Vol.-% hinaus, kann davon ausgegangen werden, dass die Flammenlänge abnimmt, da die reine Wasserstoffflamme eine

sehr geringe Höhe aufweist. Auch in der Studie von El-Ghafour et al. [6] wurde zunächst ein Anstieg der Flammenlänge bis zu einer Wasserstoffbeimischung von 20 Vol.-% festgestellt. Bei weiterer Erhöhung kam es zur Verkürzung der Flamme [6].

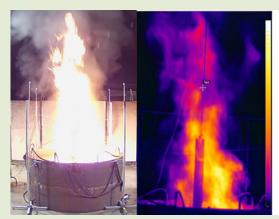
Da die Wasserstoffflamme vor allem im UV-Bereich emittiert [11, 12], wurde durch die Beimischung eine schlechtere Sichtbarkeit der Flamme erwartet. Allerdings hat sich im Bereich von 30 Vol.-% bis 40 Vol.-% eine Erhöhung des Gelbanteils in der Flamme gezeigt, wodurch die Flamme entgegen der Erwartung gut sichtbar war. Die Strahlung in dem betreffenden Wellenlängenbereich resultiert aus C2-Verbindungen [13], weshalb darauf geschlossen werden kann, dass ein erhöhter Anteil an C2-Verbindungen in einem bestimmten Bereich der Wasserstoffkonzentration entsteht. Die Grenzen dieses Bereichs wurden in dieser Arbeit allerdings nicht untersucht. Die farblichen Unterschiede in Aufwärtsrichtung sind durch die unterschiedlichen Reaktionszonen hervorgerufen. In Düsennähe, begünstigt durch die hohe Diffusionsgeschwindigkeit, wird der Wasserstoff oxidiert. Weiter stromab ist die Reaktion des Methans am Leuchten (Rußbildung) zu erkennen.

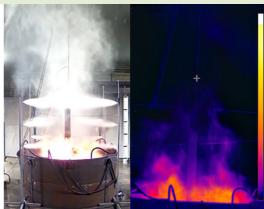
Die durch die Forschungsstelle für Brandschutz durgeführte Studie stellt eine Grundlage für weitere Untersuchungen an Methan-Wasserstoffflammen dar. Vor allem in Bezug auf die brandschutz-technischen Auswirkungen soll in Zukunft weiter geforscht werden.

CFD-basierte Entwicklung eines (hybriden) Wassernebellöschsystems zur Unterdrückung von Prozessflammen in Härtereien (2021-2022)

Beim Härten von Stählen werden die bis zu 900 °C erhitzten Chargen durch Eintauchen in ein Ölbad abgeschreckt. Dabei

Bild 2.17: Links: freie Modellflamme; rechts: unterdrückte Modellflamme mit Wassernebel (jeweils VIS-/IR-Bild).





verdampft in unmittelbarer Umgebung um die heiße Charge Härteöl, das sich an den noch oberhalb des Ölspiegels befindlichen heißen Chargenteilen sofort entzündet. Es entstehen mehrere Meter hohe Prozessflammen, deren Rauchgase die Umgebung mit gesundheitsgefährdenden Stoffen kontaminieren. Weiterhin besteht die Gefahr einer Entzündung der gesamten Ölbadoberfläche mit einer drastisch erhöhten Wärmeentwicklung. Im Rahmen des Kooperationsprojektes (Aif-ZIM Reese) wird untersucht, wie durch den Einsatz eines Wassernebels, der beim Abschreckvorgang oberhalb des Ölbades eingedüst wird, und in Kombination mit einer inerten Gasschicht (Stickstoff) auf der Ölbadoberfläche, die Flammenbildung unterdrückt werden kann. Da über die Charakteristik von Öldampfbränden in Härtereien wenig bekannt ist und hierbei insbesondere das Verhalten des Wassernebels bedingt durch die heiße Stahlcharge viele noch unklare Parameter aufweist (z. B. Wechselwirkung der Tröpfchen mit der Auftriebsströmung), werden durch Experiment und Simulation planmäßig Daten ermittelt und Kenntnisse erworben, um schließlich einen Lösch-Prototypen zu entwickeln. Dieser wird zur Validierung der technischen Grundlagen im aufwändigen Realversuch in der Härterei Reese getestet. Erste Modellversuche, in denen Parameter wie die Wassernebel- und Stickstoffmenge, sowie Eindüseposition und verschiedene Kombinationen systematisch variiert wurden, liefern bereits vielversprechende Ergebnisse über den Erfolg der Flammen- und Raucheindämmung. Zudem wurde die Vermeidung einer direkten Wasserbeaufschlagung des Ölbades als wichtiger Erfolgsfaktor identifiziert, welcher in kommenden Versuchen noch optimiert werden soll (Bild 2.17).

Literatur

- [1] DVGW, Wasserstoff-Beimischung: Sicherheit in Ihrem Zuhause., Broschüre, 2021.
- [2] DVGW; E.ON; Avacon: Erstmals 20 Prozent Wasserstoff im deutschen Gasnetz: Innovationsprojekt von E.ON, Avacon und DVGW startet mit Wasserstoffbeimischung. 2021.

- [3] Hu, E.; Huang, Z.; He, J.; Jin, C.; Zheng, J.: Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames. International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009) Nr. 11, S. 4876-4888, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.058.
- [4] Di Sarli, V.; Di Benedetto, A.: Laminar burning velocity of hydrogen-methane/air premixed flames. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) Nr. 5, S. 637-646, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.016.
- [5] Boushaki, T.; Dhué, Y.; Selle, L.; Ferret, B.; Poinsot, T.: Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: Experimental and numerical analysis. International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) Nr. 11, S. 9412-9422, DOI: 10.1016/j.ijhydene. 2012.03.037.
- [6] El-Ghafour, S.; El-dein, A.; Aref, A.: Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) Nr. 6, S. 2556-2565, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.12.049.
- [7] Mardani, A.; Tabejamaat, S.: Effect of hydrogen on hydrogen-methane turbulent non-premixed flame under MILD condition. International Journal of Hydrogen Energy 20 (2010), S. 11324-11331, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.06.064.
- [8] Max, D.; Braun, J.; Dinkov, I.; Trimis, D.: Flame Length Measurement in Compartment Fires with Image Analysis. European Combustion Meeting, 2021.
- [9] SedImaier, J.: Numerische und experimentelle Untersuchung an einer abgehobenen Flamme unter Druck. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2019.
- [10] Fairweather, M.; Ormsby, M. P.; Sheppard, C.; Woolley, R.: Turbulent burning rates of methane and methane–hydrogen mixtures. Combustion and Flame 156 (2009) Nr. 4, S. 780–790, DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.02.001.
- [11] Droste, B.; Eder, A.; Karl, W.; Kesten, M.; Musiol, F.; Rohde, J.; Sauer, G.; Szamer, R.; Ziegler, H.-P.: Anwendung der Wasserstoff-Technologie Eine Bestandsaufnahme: des Arbeitskreises Wasserstofftechnologie der SFK. Bericht der Störfallkommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, S. 10, 2002.
- [12] Gauglitz, G.; Löbert, H.: Einführung in die Spektroskopie: Das elektromagnetische Spektrum und dessen Spektralbereiche. Online. http://www.chemgapedia.de.
- [13] Lux, J.; Haidn, O.: Flame Stabilization in High-Pressure Liquid Oxygen/Methane Rocket Engine Combustion. Journal of Propulsion and Power 25 (2009) Nr. 1, S. 15-23, DOI:10.2514/1.36852.

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, Armatu-

www.gwf-gas.de 37

ren 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 Wasserstoffs zunehmend an Gewicht und bestreicht auch die Prüfbereiche. Nachfolgend findet sich ein Rückblick auf 2022 aus Sicht der Prüfung und Forschung.

Prüflaboratorium Gas

In Jahr 2022 standen wieder diverse Begutachtungen an, um die durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) ausgesprochenen Akkreditierungen und Anerkennungen in folgenden Bereichen bzw. Richtlinien aufrecht zu erhalten:

- 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) Nr. 305/2011
- Prüfungen nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
- Prüfungen nach Gasgeräteverordnung (EU) 2016/426 (GAR).

Letztendlich konnte durch die sehr gute Zusammenarbeit im Bereich Prüfung die Begutachtungen ohne größere Probleme erfolgreich gestaltet werden. In diesem Fall ist auch der Bereich Prüfung aus dem Bereich Gastechnologie zu erwähnen, der hierzu wichtige Arbeiten geleistet hat.

Im Rahmen dieser Akkreditierungen ist dem Prüflaboratorium als Gas-Prüfstelle zusätzlich auch die Kompetenz für die "interne Kalibrierung" von Temperaturmesseinrichtungen und Klimaschränken bescheinigt bzw. bestätigt worden.

Für die Durchführung der Prüfungen im Rahmen der Bauproduktenverordnung wird das Prüflaboratorium als benannte Stelle mit der Nummer 2403 im Informationssystem Nando (New Approach Notified and Designated Organisations) der Europäischen Kommission geführt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es somit dem Labor möglich ist, Prüfungen aller Komponenten und Materialien sowie Sicherheitseinrichtungen der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischer Phänomene im Komplettpaket durchzuführen.

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), die u. a. auf die europäische Verordnung 813/2013 verweist, welche die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von gas- und ölbetriebenen Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten regelt, werden durch MitarbeiterInnen des Prüflaboratoriums weiterhin, auch durch Beteiligung an europäischen Gremien, unterstützt.

Prüflaboratorium Gas – Normung und Standardisierung

Auch im zurückliegenden Jahr setzten sich die MitarbeiterInnen des Prüflaboratoriums im Rahmen der Regelsetzung, neben den DVGW-internen Gremien und Ausschüssen, vor allem auch in nationalen (ca. 35 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:innen 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 einige Europäische Prüfnormen überarbeitet und dabei die Anpassung an die Verordnung (EU) 2016/426 über Geräte zur Verbrennung gasförmiger Brennstoffe (GAR) umgesetzt wurde. In vielen Technischen Komitees des CEN (z. B. TC 58, 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 Ausbau der H₂-Kompetenz im DVGW und damit der nationalen und europäischen Normung wird auch durch ein Investitionsprogramm unterstützt. Die Mitarbeiter der Prüfstelle haben weiterhin die Entwicklung von Zertifizierungsprogrammen (ZP's) der DVGW CERT GmbH aktiv unterstützt. Entsprechende Verfahren (u.a. ZP3100.20, ZP3100.100, ZP5101, ...) wurden bereits bei aktuellen Zertifizierungsprozessen und zugehörigen Prüfungen eingesetzt.

Prüflaboratorium Gas – Prüftätigkeiten

Im Bereich Verbrennungstechnik war neben der Beteiligung bei Untersuchungen an wasserstofforientierten Projekten die initiative Entwicklung der Prüfvorschriften und Zertifizierungsprogramme für die Zertifizierung von Gasgeräten zum Betrieb mit Methan/Wasserstoff-Gemischen (bis 20 % H₂-Zumischung sowie 100 % H₂) eine herausragende Aktivität. Weitere Prüfvorschriften, auch für höhere Zumischungen von Wasserstoff bzw. 100 % Wasserstoff, und für grundsätzliche Eigenschaften im Umfeld Wasserstoff für Komponenten und Materialien wurden abgeschlossen oder befinden sich in der Umsetzung.

In Zuge der zunehmenden Aktivitäten und Herausforderungen in der Gaswelt wurden zahlreiche Heizgeräte mit wasserstoffhaltigen Gemischen geprüft. Auch im Rahmen der Gasgerätearmaturen konnte eine Zunahme der Projekte bzgl. der Anwendung von Wasserstoff festgestellt werden. Bei den Armaturen für Gasverteilungssysteme sind die verschiedenen Hersteller jedoch noch abwartend bzgl. der Prüfungen mit Wasserstoff und war-

Bild 2.18: MFM-Prüfstand vom DVGW-Projekt ECLHYPSE, Ouelle DVGW-EBI.



ten auf die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse aus den verschiedenen Forschungsprojekten, wie z. B. dem DVGW-Projekt ECLHYPSE und deren Umsetzung in den Zertifizierungsprogrammen und nationalen und europäischen Normen.

Weiterhin standen im Bereich der Armaturen im Jahr 2022 weitreichende personelle Veränderungen an. Nach mehr als 37 Jahren hat der Gruppenleiter des Bereiches, Herr Hubert Franzen das Prüflaboratorium Gas verlassen und ist in den wohlverdienten Ruhestand gegangen. Dementsprechend musste die Gruppenleitung "Armaturen" zum 01.07.2022 neu besetzt werden. Das Prüflaboratorium Gas freut sich, dass Herr Michael Kunert überzeugt werden konnte die Nachfolge von Herrn Franzen anzutreten. Die Kontinuität der Prüftätigkeiten kann damit gewährleistet werden, so dass auch Raum bleibt, um an neue Themen zu arbeiten, über die wir dann im nächsten Jahr berichten können.

Allgemein lässt sich sagen, dass trotz der weiterhin in 2022 bestehenden Auswirkungen durch COVID-19 und auch der Ukraine-Krise, die Anzahl der Prüfaufgaben und den allgemeinen Anfragen in den Bereichen Verbrennungstechnik, Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen und Armaturen der Hersteller weitestgehend beständig waren und zuverlässig bearbeitet werden konnten.

Prüflaboratorium Gas – Forschung und Entwicklung

In 2022 lag der Fokus der Forschungsaktivitäten auf Weiterentwicklungen in der Wasserstoffthematik. Dabei wurden, neben den schon laufenden Projekten, weitere Projekten mit folgenden Schwerpunkten initiiert:

- Umstellung der Gasinfrastruktur auf 100 Vol.-% H₂: Materialverträglichkeit, regulatorische Aspekte (EU und DVGW-Regelwerk), Sicherheits- und Messkonzepte
- Abtrennung von CO₂ und H₂ aus Prozessgasen
- Dichtheits- bzw. Leckratenmessungen mit H₂

Diese Projekte werden nachfolgend zusammenfassend vorgestellt.

Dichtheits- bzw. Leckratenmessung: ECLHYPSE-Projekt

Das am 01.04.2022 gestartete DVGW-Projekt fokussiert sich auf die Ermittlung von Umrechnungsvorschriften, die dazu dienen,

Luftleckraten über einen breiten Druckbereich auf verschiedene brennbare Gase (H₂, CH₄ und deren Mischungen) umrechnen zu können. Damit soll sichergestellt werden, dass in der industriellen Produktion weiter mit Luft geprüft werden kann, aber auch damit Baumusterprüfungen sicher durchgeführt werden können. Dabei liegt der Fokus auch auf der Berücksichtigung von Strömungsphänomenen, v.a. im Übergangsregime. Zur Charakterisierung der Leckraten wurden zusammen mit dem Projektpartner GWI verschiedene Messmethoden (basierend auf dem Volumenstrom- und dem Druckabfallprinzip) implementiert sowie verschiedene Prüfstände aufgebaut und eingesetzt. Einer dieser Prüfstände ist z. B. der Massendurchfluss-Prüfstand (MFM-Methode), der in Bild 2.18 zu sehen ist. Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und Reproduzierbarkeit. Die ermittelten Umrechnungsfaktoren erlauben die Abdeckung mehreren Anwendungen vom Verteilnetz bis zum eingebauten Gerät in der Hausinstallation.

Abtrennung von CO₂ und H₂ aus Prozessgasen: MemKoWi

Im Rahmen des im November 2022 gestarteten BMWK-Projekts sollen Membranen zur Abscheidung von CO₂ und H₂ aus Prozessgasen der Stahlindustrie erforscht und entwickelt werden. Das DVGW-EBI wird zusammen mit dem Projektkoordinator Hereon und dem FZJ Polymer keramische Membrane charakterisieren (v. a. mit Permeationsmessungen auf einem Prüfstand), sowie bei der Modellierung der Membranen unterstützen und koordiniert ebenfalls die Literaturrecherche. Das Projekt soll bis Mitte 2026 laufen.

Umstellung der Gasinfrastruktur: TrafoHyVE

Das BMWK-Projekt wurde am 01.01.2022 gestartet und wird von den Stadtwerken Karlsruhe koordiniert. Im Vorhaben soll die Umstellung verschiedener Verteilnetzgebiete auf bis zu 100 Vol.-% H₂ untersucht werden. Der DVGW-EBI-Beitrag umfasst die Inventarisierung von Bestandsnetzen und Auswahl der relevanten Eigenschaften, die Bestandsaufnahme der Prüf- und Zertifizierungsverfahren, die Entwicklung von Prüfgrundlagen und Durchführung der Komponenten- und Materialprüfungen auf Basis neuer Prüfgrundlagen und H₂-Dichtheitsuntersuchungen

www.gwf-gas.de

von Verteilnetz-Bestandskomponenten mit einem Druckabfall-Prüfstand, der am EBI aufgebaut wurde. Das Projekt läuft bis Ende 2024.

Dichtheits- und Leckratenmessung: HydEKuS

Das DVGW-Nachfolgeprojekt von FuE für $\rm H_2$ wurde offiziell am 01.10.2022 gestartet und soll weitere $\rm H_2$ -relevante Erkenntnisse gewinnen, um neue DVGW CERT-Zertifizierungsprogramme auf den Weg zu bringen. Somit werden Dichtheits- und Permeationsmessungen von Elastomeren, Kunststoffen, Flachdichtungswerkstoffen, Schmiermitteln und Fetten, sowie von Dichtmitteln durchgeführt. An diesem Vorhaben arbeiten die FuE Gasanwendung und Materialprüfung zusammen.

Neben den initiierten Projekten konnten auch bei laufenden Projekten Aktivitäten vorangetrieben werden (siehe die folgende Projektauswahl):

FuE für H₂

Im Rahmen dieses DVGW-Projektes sollen neue $\rm H_2$ -Prüfprogramme für die Erarbeitung von neuen DVGW CERT-Zertifizierungsprogrammen ermittelt werden. Das DVGW-EBI unterstützte bei der fachlichen Erstellung einer Bewertungsmatrix zur $\rm H_2$ -Verträglichkeit von Materialien, die später in eine übergreifende $\rm H_2$ -Datenbank (verifHy) des DVGW fließen wird. Zusammen mit der Arbeitsgruppe Materialprüfung wurden weitere Erkenntnisse zur Beständigkeit von Dichtungen/Elastomeren gewonnen, die im Expertenkreis großen Anklang fanden. Hierzu wurden zwei Alterungsloops von O-Ringen (thermische Zyklen und Ozon-Lagerung) und darüber hinaus Permeationsmessungen von Flanschen durchgeführt und Rechenbeispiele festgelegt. Hervorzuheben sind die $\rm H_2$ -Dichtheitsmessungen von O-Ringen. Dabei zeigten diese ein sehr gutes Dichtheitsverhalten in einem Zeitraum von mehr als sechs Monaten.

H₂-20

Die Einspeiseaktivitäten liefen in 2022 weiter. Nach der erfolgreichen ersten Heizsaison (Nov. 2021 bis April 2022) mit Einspeisestufen 10, 15 und 20 Vol.-% lief auch die zweite Heizsaison in KW 44 mit dynamischer Einspeisung von zyklischen 0, 10, 13, 16,5 und 19,5 Vol.-% Stufen ohne sicherheitstechnisch relevante Aufälligkeiten bei den 352 Gasgeräten an. Das Projekt läuft in 2023 weiter und wird weitere Erkenntnisse zur Einspeisung von Wasserstoff in vorhandene Netze liefern.

THyGA

Im Rahmen des EU-Projekts konnte das Messprogramm der 23 eingeplanten Geräte erfolgreich abgeschlossen werden. Verschiedene Gerätetypen (v.a. Brennwertgeräte, Kochgeräte und Grillgeräte) wurden mit bis zu 60 Vol.-% $\rm H_2$ in CH₄ vermessen. Dabei wurden alle Sicherheits- und Funktionsaspekte geprüft (verzögerte Zündung, Teil- und Volllastverhalten, Emissions- und Wirkungsgradmessungen...). Aktuell läuft die Berichtsphase. Die Erkenntnisse dieses Projektes fließen dann anschließend in die europäische Normung auf CEN Ebene ein.

2.6 Veröffentlichungen

Journal- und Buchveröffentlichungen

- Casel, M.; Oberleithner, K.; Zhang, F.; Zirwes, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Kaiser, T. L.:

 Resolvent-based modelling of coherent structures in a turbulent jet flame using a passive flame approach. Combustion and Flame 236 (2022), S. 111695, DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111695.
- Christou, T.; Stelzner, B.; Zarzalis, N.: Spray response on a model prefilmer under unsteady airflows of various frequencies. International Journal of Spray and Combustion Dynamics 14 (2022) Nr. 1-2, S. 98-106, DOI: 10.1177/17568277221092987.
- De Giorgi, M. G.; Bonuso, S.; Mehdi, G.; Shamma, M.; Harth, S. R.; Zarzalis, N.; Trimis, D.: Enhancement of Blowout Limits in Lifted Swirled Flames in Methane-Air Combustor by the Use of Sinusoidally Driven Plasma Discharges. Active Flow and Combustion Control 2021, 152, (2022), S. 66–82, Springer International Publishing, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-90727-3_5.
- Dinkov, I.; Braun, J.; Meyer-Hollmann, M.: Behälter zum Transport von beschädigten Lithium-Ionen-Batterien", BRANDSchutz 76 (2022), Nr. 2, S. 93-97.
- Giakoumatou, E.; Goßmann, A.-K.; Stelzner, B.; Trimis, D.: Simultaneous Compression and Absorption for Energy-Efficient Dissolution of Gases in Liquid. Chemie Ingenieur Technik 94 (2022) Nr. 3, S. 309-313, DOI: 10.1002/cite.202100153.
- Hagen, F. P.; Suntz, R.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Dual-pulse laser-induced incandescence to quantify carbon nanostructure and related soot particle properties in transient flows Concept and exploratory study. Combustion and Flame (2022), S. 112020, DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112020.
- Hagen, F. P.; Vlavakis, P.; Seitz, M.; Klövekorn, T.; Bockhorn, H.; Suntz, R.; Trimis, D.: Soot nanoparticle sizing in counterflow flames using in-situ particle sampling and differential mobility analysis verified with two-color time-resolved laser-induced incandescence. Proceedings of the Combustion Institute (2022), DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.253.
- Kaddar, D.; Steinhausen, M.; Zirwes, T.; Bockhorn, H.; Hasse, C.; Ferraro, F.: Combined effects of heat loss and curvature on turbulent flame-wall interaction in a premixed dimethyl ether/air flame. Proc. Combust. Inst. (2022), online, DOI: 10.1016/j.proci.2022.08.060.
- Kaiser, T. L.; Varillon, G.; Polifke, W.; Zhang, F.; Zirwes, T.; Bockhorn, H.; Oberleithner, K.: Modelling the response of a turbulent jet flame to acoustic forcing in a linearized framework using an active flame approach. arXiv (2022), DOI: arXiv:2211.13888.
- Kaleris, K.; Stelzner, B.; Hatziantoniou, P.; Trimis, D.; Mourjopoulos, J.: Laser-Sound Transduction from Digital -Δ Streams. AES: Journal of the Audio Engineering Society 70 (2022) Nr. 1-2, S. 50-61, DOI: 10.17743/jaes.2021.0053.
- Khare, R.; Vlavakis, P.; Langenthal, T. von; Loukou, A.; Khosravi, M.; Kramer, U.; Trimis, D.: Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on the sooting limit and structure of methane/air laminar counterflow diffusion flames. Fuel 324, Part B (2022) S. 124506, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124506.
- Koch, S.; Hagen, F. P.; Büttner, L.; Hartmann, J.; Velji, A.; Kubach, H.; Koch, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Suntz, R.: Influence of Global Operating Parameters on the Reactivity of Soot Particles from Direct Injection Gasoline Engines. Emission Control Science and Technology 8 (2022) S. 9-35, DOI: 10.1007/s40825-022-00211-y.
- Mätzing, H.; Vlavakis, P.; Trimis, D.; Stapf, D.: A computational fluid dynamics study of flame gas sampling in horizontal dilution tubes. Flow: Applications of Fluid Mechanics 2 (2022) S. E17, DOI: 10.1017/flo.2022.10.
- Schelb, D.: Transportmittel für defekte E-Fahrzeuge, BRANDSchutz 76 (2022), Nr. 2, S. 98-99.
- Secchi, F.; Häber, T.; Gatti, D.; Schulz, S.; Trimis, D.; Suntz, R.; Frohnapfel, B.: Turbulent impinging jets on rough surfaces. GAMM-Mitteilungen 45 (2022) Nr. 1, S. e202200005, DOI: 10.1002/gamm.202200005.

- Sentko, M. M.; Schulz, S.; Weis, C.; Stelzner, B.; Anderlohr, C.; Vicari, M.; Trimis, D.: Experimental investigation of synthesis gas production in fuel-rich oxy-fuel methane flames. Fuel 317 (2022) S. 123452, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123452.
- Steinhausen, M.; Zirwes, T.; Ferraro, F.; Popp, S.; Zhang, F.; Bockhorn, H.; Hasse, C.:
 Turbulent flame-wall interaction of premixed flames using Quadrature-based Moment Methods (QbMM) and tabulated chemistry: An a priori analysis. International Journal of Heat and Fluid Flow 93 (2022) S. 108913, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108913.
- Steinhausen, M.; Zirwes, T.; Ferraro, F.; Scholtissek, A.; Bockhorn, H.; Hasse, C.: Flame-vortex interaction during turbulent side-wall quenching and its implications for flamelet manifolds. Proc. Combust. Inst. (2022), online, DOI: 10.1016/j.proci.2022.09.026.
- Tavakkol, S.; Zirwes, T.; Denev, J. A.; Bockhorn, H.; Stapf, D.: Modeling of radiation heat transfer in dense-bed flows of solids in indirectly heated rotary kilns. Thermal Science and Engineering Progress (2022) S. 101545, DOI: 10.1016/j. tsep.2022.101545.
- Wang, Y.; Han, W.; Zirwes, T.; Zhang, F.; Bockhorn, H.; Chen, Z.: Effects of low-temperature chemical reactions on ignition kernel development and flame propagation in a DME-air mixing layer. Proc. Combust. Inst. (2022), online, DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.024.
- Wen, X.; Zirwes, T.; Scholtissek, A.; Böttler, H.; Zhang, F.; Bockhorn, H.; Hasse, C.: Flame structure analysis and composition space modeling of thermodiffusively unstable premixed hydrogen flames – Part I: Atmospheric pressure. Combustion and Flame 238 (2022) S. 111815, DOI: 10.1016/j.combust-flame.2021.111815.
- Wen, X.; Zirwes, T.; Scholtissek, A.; Böttler, H.; Zhang, F.; Bockhorn, H.; Hasse, C.: Flame structure analysis and composition space modeling of thermodiffusively unstable premixed hydrogen flames Part II: Elevated pressure. Combustion and Flame 238 (2022) S. 111808, DOI: 10.1016/j.combust-flame.2021.111808.
- Wieland, C.; Weis, C.; Habisreuther, P. und Trimis, D.: 3D direct pore level simulations of radiant porous burners. Combustion and Flame 245 (2022) S. 112370, DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112370.
- Zhang, F.; Kurjata, M.; Sebbar, N.; Zirwes, T.; Fedoryk, M.; Harth, S.; Wang, R.; Habisreuther, P.; Trimis, D. und Bockhorn, H.: Numerical Study on Flame Stabilization and NOx Formation in a Novel Burner System for Sulfur Combustion. Energy & Fuels 36 (2022) Nr. 7, S. 4094-4106, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c04007.
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Wang, Y.; Chen, Z.; Bockhorn, H.; Trimis, D. und Stapf, D.: Dynamics of Premixed Hydrogen/Air Flames in Unsteady Flow. Phys. Fluids 34 (2022) Nr. 5.0098883, S. 085121, DOI: 10.1063/5.0098883.
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Wachter, S.; Jakobs, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Kolb, T.; Bockhorn, H. und Stapf, D.: Numerical simulations of air-assisted primary atomization at different air-to-liquid injection angles. International Journal of Multiphase Flow (2022) S. 104304, DOI: 10.1016/j.ijmultiphase-flow.2022.104304.
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Häber, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Suntz, R. und Stapf, D.: Correlation of heat loss with quenching distance during transient flame-Wall interaction. Proc. Combust. Inst. (2022), online, DOI: 10.1016/j. proci.2022.10.010.
- Zirwes, T.; Zhang, F. und Bockhorn, H.: Memory effects of local flame dynamics in turbulent premixed flames. Proc. Combust. Inst. (2022), online, DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.187.

Beiträge auf Konferenzen und Berichte

Barata, B. A. C.; Dias, B. S.; Navalho, J. E. P.; Schneider, M.; Weinbrecht, P.; Weis, C.; Trimis, D.; Pereira, J. C. F.: Numerical Investigation of an Innovative Furnace

- Concept for Coil Coating Process. 13th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, (2022), 19-22 April, Algarve, Portugal.
- De Giorgi, M. G.; Mehdi, G.; Bonuso, S.; Shamma, M.; Harth, S.; Trimis, D.; Zarzalis, N.: Characterization of Flame Behavior and Blowout Limits at Different Air Preheating Temperatures in Plasma Assisted Stabilized Combustor. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, (2022), GT2022-83239, June 13-17, Rotterdam, The Netherlands, DOI: 10.1115/GT2022-83239.
- Fedoryk, M.; Stelzner, B.; Harth, S.; Trimis, D.: Laminar combustion wave velocity and structure investigation in Bunsen type iron dust burners. Jahrestagung des KIT Zentrum Energie (2022), 14. Juli, Karlsruhe.
- Fedoryk, M.; Stelzner, B.; Harth, S.; Trimis, D.; Poster: Laminar combustion wave velocity and structure investigation in Bunsen type iron dust burners. Clean Circles, Retreat Meeting, June 21, 2022.
- Hagen, F. P.; Suntz, R.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Non-intrusive and time-resolved in-situ diagnostics for quantifying the nanostructure and size distribution of gas-borne carbon nanoparticles. 11th International Aerosol Conference, (2022), September, 4-9, Athens, Greece.
- Harth, S.; Shamma, M.; Trimis, D.: Magere Verlöschgrenzen von Multi-Brennern mit abgehobenen Flammen bei geneigter Brenner-Anordnung. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Energieverfahrenstechnik, Gasreinigung, Hochtemperaturtechnik, Rohstoffe (2022), 30. März – 1. April, Bamberg.
- Heidarifatasmi, H.; Zarzalis, N.; Trimis, D.: Numerical simulations of iron particle dispersion in a fan stirred closed vessel. Jahrestagung des KIT Zentrum Energie (2022), 14. Juli, Karlsruhe.
- Heidarifatasmi, H.; Trimis, D.; Zarzalis, N.; Poster: Numerical Simulations of Iron Particle Dispersion in a Fan-stirred Closed Vessel. Clean Circles, Retreat Meeting, June 21, 2022.
- Kaiser, T.; Varillon, G.; Polifke, W.; Zirwes, T.; Zhang, F.; Bockhorn, H.; Oberleithner, K.: Linearizing a turbulent Bunsen flame. 18th International Conference on Numerical Combustion, (2022), 127CDIQ-0226, May 11, San Diego. USA.
- Steinhausen, M.; Zirwes, T.; Ferraro, F.; Popp, S.; Zhang, F.; Bockhorn, H.; Hasse, C.:

 Modelling of the joint probability function in turbulent flame-wall interaction of premixed flames using quadrature-based moment methods and tabulated chemistry. 8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, (2022), June 5-9 Oslo. Norway.
- Tavakkol, S.; Zirwes, T.; Denev, J. A.; Bockhorn, H.; Stapf, D.: Modeling of radiation heat transfer in the dense-bed flow of solid pyrolysis in indirectly heated rotary kilns. Proceedings of the European Conference on Industrial Furnaces and Boilers 13, (2022), 19-22 April, Algarve, Portugal, DOI: 10.5445/ IR/1000148339.
- Vignat, G.; Toro, E.; Zirwes, T.; Biogne, E.; Ihme, M.: Unsteady thermal and chemical response of a porous media burner to fuel supply interruption: application to carbon-free NH3/H₂/air flames. 75th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (APS Physics), (2022), Nr. J25.00009, November 20-22, Indianapolis, IN, USA.
- Vignat, G.; Zirwes, T.; Garza, E. R.; Biogné, E.; Trimis, D.; Ihme, M.: Ammonia combustion in inert porous media burners: systematic experimental characterization and chemical kinetics analysis. 1st Symposium on Ammnia Energy, (2022), September 1-2, Cardiff, United Kingdom.
- Weinbrecht, P.; Schneider, M.; Wieland, C.; Weis, C.; Trimis, D.: Eine Pilotanlage zur energieeffizienten Stahlbandbeschichtung. Jahrestreffen der Process-Net-Fachgruppen Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Energieverfahrenstechnik, Gasreinigung, Hochtemperaturtechnik, Rohstoffe (2022'), 30. März 1. April, Bamberg.
- Weinbrecht, P.; Schneider, M.; Wieland, C.; Weis, C.; Trimis, D.: Eine Pilotanlage zur energieeffizienten Stahlbandbeschichtung. (Bio)Process Engineering – a Key to Sustainable Development, Joint event of ProcessNet and DECHE-MA-BioTechNet Jahrestagung together with 13th ESBES Symposium (2022), September 12-15, Aachen.

www.gwf-gas.de 41

Zeh, K.; Dinkov, I.; Weiser, P.: Unterventilierte Realbrände - Experimentelle Untersuchungen zu Wohnungsbränden bei Luftmangel. Forschungsbericht Nr. 213, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik. https://www.ffb.kit.edu/download/IMK%20Ber.%20Nr.%20213%20 Zeh Dinkoy%20Untervent%20Braende.odf

Zirwes, T.: Application of Cantera for detailed combustion simulations and porous burners with ammonia flames. Cantera Workshop at the 2022 International Symposium on Combustion (2022), July 22-23, Vancouver, Canada.

3. Wasserchemie und Wassertechnologie und DVGW-Forschungsstelle

Harald Horn, Gudrun Abbt-Braun, Andrea Hille-Reichel, Florencia Saravia, Fritz H. Frimmel

3.1 Forschung und Lehre

Forschung

Im Jahr 2022 konnten die durch die Corona-Pandemie bedingten Beschränkungen sukzessive zurückgenommen werden, und es war, wenn auch weiterhin mit an die jeweiligen Erfordernisse angepassten Sicherheitsmaßnahmen, ein weitgehend regulärer Vorlesungs- und Institutsbetrieb möglich.

Im vergangenen Jahr konnten einige Forschungsprojekte erfolgreich abgeschlossen werden, wie etwa das Projekt "Verhalten von Antibiotika in Flüssen und Flusssedimenten und ihre Auswirkungen auf die Ausbreitung der Antibiotikaresistenzen in der natürlichen Umwelt", gefördert von der Baden-Württemberg Stiftung. In den folgenden Ausführungen werden daraus einige Ergebnisse dargestellt. Abgeschlossen wurde auch das von der Europäischen Union geförderte Projekt "Verarbeitung hydrothermaler Verflüssigungsprodukte mit Membrantechnologien". Eine Zusammenfassung einer im Rahmen des Projektes durchgeführten Promotionsarbeit wird ebenfalls im Folgenden weiter ausgeführt.

Im laufenden BMBF geförderten Verbundprojekt zur Wasserstoffstrategie konnten mittlerweile einige Versuchsstände in Betrieb genommen werden (siehe hierzu auch den Beitrag in den folgenden Ausführungen). Dies gilt auch für das Projekt "KoalAplan", bei dem die experimentellen Arbeiten auf der Versuchskläranlage in Büsnau mit verschiedenen Pilotreaktoren angelaufen sind (Mikrosiebung, Reaktor für die Dunkelfermentation; ein bioelektrochemisches System (BES) um Wasserstoff zu produzieren wird folgen). Große Anstrengungen waren 2022 im Projekt "PeePowerTM" zu leisten. Ein bioelektrochemischer Pilotreaktor wird im April auf der Bundesgartenschau 2023 in Mannheim aus dem Urin einer öffentlichen, mit einer Urinseparation ausgestatteten Toilette Wasserstoff produzieren (Bild 3.1). Entscheidend ist bei den Projekten "KoalAplan" und "PeePowerTM" jeweils die Stromquelle, die durch die anodische Aktivität von elektroaktiven Mikroorganismen gedeckt werden soll.

Lehre

Die Studienanfängerzahlen haben wie auch in den Vorjahren nicht zugenommen. Im WS 22/23 waren im Bachelorprogramm "Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik" 132 Studierende und im Bachelorprogramm "Bioingenieurwesen" 55 Studierende im ersten Semester immatrikuliert. Eine Stagnation und auch ein Rückgang in den ingenieur- und naturwissenschaftli-

chen Fächern wird auch an anderen Universitäten beobachtet und gibt Anlass zur Sorge. Im internationalen englischen Masterstudiengang "Water Science and Engineering" sinken die Zahlen ebenfalls (ca. 20 Studierende). Das Interesse der Studierenden am wasserausgelegten Profil A (Water Technologies and Urban Water Cycle) mit den Veranstaltungen "Water Technology", "Membrane Technology in Water Treatment" und "Fundamentals of Water Quality" ist weiterhin sehr groß. Dies gilt auch für die im SS 2022 zum ersten Mal angebotene Veranstaltung "Industrial Wastewater Treatment". Die hohe Beteiligung an den Veranstaltungen spiegelt sich auch in der großen Nachfrage an experimentellen Masterabschlussarbeiten.

Im vergangenen Jahr wurden die traditionellen Freitagsseminare größtenteils noch immer im Online-Modus angeboten. Dieser Modus ist weiterhin bei den Teilnehmenden beliebt, was die konstant hohe Anzahl der Zuhörer:innen zeigt. Seit dem WS 22/23 bieten wir die Veranstaltung auch teilweise im hybriden Modus an, bei dem sowohl Vortragende als auch Zuhörer:innen entweder im Hörsaal anwesend oder online zugeschaltet sind.

Internationale Kooperationen in Forschung und Lehre

Prof. Marta Gmurek, Humboldt-Stipendiatin, hat ihre Arbeiten zur photokatalytischen Elimination von Antibiotikaresistenzgenen in biologisch gereinigtem Abwasser abgeschlossen und kehrte im August 2022 wieder an die Universität für Technologie in Lodz, Polen zurück.

Prof. Isam Sabbah aus Israel (Prof. Ephraim Katzir Department of Biotechnology Engineering am Braude College und Senior Researcher am Institute of Applied Research, The Galilee Society) ist seit September 2022 als Gastprofessor an unserem Institut. Seine Arbeiten umfassen physikalisch-chemische und biologische Prozesse in natürlichen und künstlichen aquatischen Systemen, mit einem Schwerpunkt zum Transport und Verbleib von Nano- und Mikroplastik.

Dr. Rui Du, Humboldt-Stipendiatin, hat ihre Arbeiten zur partiellen Denitrifikation/Anammox am Engler-Bunte-Institut fortgesetzt. Rui Du kommt von der Beijing University of Technology. Sie hat die Kombination der partiellen Denitrifikation bis zu Nitrit mit der anaeroben Ammoniumoxidation in den letzten Jahren ganz wesentlich vorangetrieben.

Ebenfalls aus China ist die Doktorandin Na Li im Rahmen eines einjährigen Stipendiums vom Chinese Scholarship Council zu uns gekommen. Sie bearbeitet Prozesse der Biofilmentwicklung und



Bild 3.1: "PeePowerTM": bioelektrochemische Wasserstoffproduktion aus Urin auf der BUGA 2023 in Mannheim, Außenansicht der Versuchsanlage mit einem 100 L Scheibentauchreaktor. Der produzierte Wasserstoff wird verstromt und für eine Smartphone-Ladestation zur Verfügung gestellt.

Sukzession mikrobieller Gemeinschaften in Wasserverteilungssystemen. Frau Süheyla Duran aus der Türkei hat im Dezember 2022 ihre Doktorarbeit zum Thema "Anwendung von Membranbiofilmreaktoren für die biotechnologische Produktion von Plattformchemikalien" begonnen, die Forschungsarbeit wird durch das türkische Ministerium für Nationale Bildung unterstützt.

Zum ersten Mal nach zwei Jahren Corona konnte 2022 der Advanced Biofilm Course (ABC) wieder stattfinden. 13 Doktoranden:innen und Postdoktoranden:innen aus Europa waren für eine Woche am EBI, um ihr Wissen in Mikroelektrodentechnik (Michael Kühl, Universität Kopenhagen), Bildgebung (Michael Wagner, Engler-Bunte-Institut) und Modellbildung (Cristian Picioreanu, King Abdullah University of Science and Technology) zu vertiefen. Der Kurs wird 2023 in Helsingör bei Michael Kühl stattfinden.

Frau Dr. Birgit Gordalla wurde im Februar 2022 in den Ruhestand verabschiedet. Wir wünschen ihr für diesen neuen Lebensabschnitt gute Gesundheit und viele spannende Aktivitäten. Unsere Verabschiedung ist verbunden mit einem herzlichen Dank für ihren Einsatz und die hervorragende Arbeit, die sie geleistet hat. Ihr enormes Engagement für die verschiedenen Projekte, an denen sie mitgewirkt hat, ist beeindruckend, insbesondere für die Normung von Methoden zur Untersuchung von Wasser, Abwasser und Schlamm.

Promotionen

Im Jahr 2022 wurden fünf Promotionen fertiggestellt. Im Folgenden sind die Arbeiten kurz zusammengefasst.

Im Februar 2022 verteidigte Herr M. Sc. **Florian Ranzinger** seine Dissertation mit dem Titel "Dynamic visualization of deposition processes within porous media by means of MRI" (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Hermann Nirschl).

Poröse Medien finden sich in technischen oder natürlichen Systemen wieder. Bei der Wasseraufbereitung werden Festbettfilter gezielt zum Rückhalt von partikulären Stoffen verwendet. Sie

dienen der Adsorption von gelösten Stoffen oder fungieren als Aufwuchsfläche für Mikroorganismen, um den biologischen Abbau zu verbessern. Während des Betriebs kommt es innerhalb der porösen Medien zu Ablagerungen, die einen maßgebenden Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften und damit einhergehend auf die Leistung dieser Verfahren nehmen können.

Mithilfe bildgebender Verfahren lassen sich detaillierte Aufnahmen der Ablagerungsvorgänge anfertigen. Diese dienen der qualitativen Prozessaufklärung realer Systeme und können zu deren Optimierung herangezogen werden. Aufgrund der 3D-Struktur sind poröse Medien nur wenigen bildgebenden Verfahren zugänglich. In der Dissertation wurde die Magnetresonanztomographie (MRI; engl. Magnetic Resonance Imaging) verwendet, um 3D-Aufnahmen in-situ, zerstörungsfrei und ohne Tiefenlimitierung anzufertigen. Zudem lassen sich mithilfe der MRI neben strukturellen Aufnahmen auch Strömungsmessungen durchführen.

Im Detail wurden drei Themen bearbeitet:

- Der Aufwuchs von Biofilm in einem porösen Medium bei alternierender Wasserverfügbarkeit;
- Der Verbleib von Partikeln innerhalb von granuliertem Belebtschlamm während der anaeroben Füllphase des Reaktors;
- Die Abtrennung von Partikeln innerhalb von granulierten Aktivkohlefiltern und die einhergehende Veränderung des Strömungsfeldes.

Im Besonderen sind die Ergebnisse zum Rückhalt von partikulären Stoffen (SS; engl. suspended solids) auf einem granulierten Aktiv-kohlefilter (GAC; engl. granulated activated carbon) so noch nicht gezeigt worden. Bei abwärts gerichteter Durchströmung wurden SS sowohl auf als auch innerhalb des GAC-Filters zurückgehalten. Durch die schrittweise Zugabe von SS konnten der Aufbau des Filterkuchens, Umschichtungen im porösen Medium sowie Änderungen der Einströmwege und Fließgeschwindigkeiten detailliert

erfasst werden. Das Auftreten von bevorzugten Einströmwegen hebt hervor, dass die Deckschicht nicht die komplette Oberfläche bedeckte und SS tiefer in das poröse Medium eingetragen werden. Neben der Bedeckung des Filters zeigte eine zunehmende Blockade von Porenhälsen und Komprimierung von SS mögliche Gründe für die schnell ansteigenden Druckverluste auf, die in realen Anlagen beobachtet werden. Channeling war bereits vor Beginn der Filtration präsent. Hier zeigt sich, dass mit einer Äquivalentgeschwindigkeit von 28,8 m/h der GAC-Filter weitaus schneller als erwartet durchströmt wird. Die Grundannahme einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 5 bzw. 12,5 m/h (inklusive Porosität) wurde um den Faktor 2,3 übertroffen. Mit zunehmender Filtrationsdauer wurden die Channeling-Effekte deutlicher. Nach 3,75 h wurde eine Äquivalentgeschwindigkeit von 68,4 m/h gemessen, die nach 7,75 h auf 100,8 m/h anstieg.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Eignung der MRI zur Prozessaufklärung von Ablagerungsprozessen in porösen Medien. Mithilfe der MRI war es möglich, Multikomponentensysteme durch die Auswahl der Aufnahmeparameter und weitergehender Bildanalyse zu visualisieren und zeitlich nachzuverfolgen. Weiterhin stellen die Ergebnisse einzigartige Abbildungen der Ablagerungsvorgänge dynamisch dar, die das bestehende Wissen erweitern und zur Optimierung großtechnischer Prozessabläufe beitragen können.

Die Arbeit ist im Jahr 2022 in der Schriftenreihe Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie erschienen und ist über das Sekretariat des Lehrstuhls erhältlich (Band 84).

Im Juni 2022 verteidigte Herr M. Sc. **Ali Sayegh** seine Dissertation mit dem Titel "Membrane technologies – adequate solutions for treatment of hydrothermal liquefaction wastewater" (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart (TU Darmstadt)).

Ziel der Doktorarbeit war die Bewertung von Membrantechnologien für die Behandlung von Abwasser aus der hydrothermalen Verflüssigung von kommunalem Klärschlamm (hydrothermal liquefaction wastewater; HTL-WW). HTL-WW besteht aus einem komplexen Gemisch, enthalten sind gelöste organische und anorganische Stoffe. Charakteristisch für HTL-WW ist ein hoher Anteil von Ammonium sowie eine signifikante Belastung durch Schwebstoffe und Ölemulsionen. Die Aufbereitung von HTL-WW durch Membranen wurde in zwei Schritten untersucht.

Der erste Schritt war die Anwendung der Ultrafiltration (UF), die zur Abtrennung von Schwebstoffen und Ölemulsionen eingesetzt wurde. Bei der Behandlung mit einer getauchten Membran wurde die Membranfiltration mit Luftstrippung kombiniert, um Ammoniak abzutrennen. Bei Verwendung einer Cross-Flow UF konnten in Kombination mit der Membrandestillation (MD) der organische Kohlenstoff und die HTL-Katalysatoren (NaOH und K_2CO_3) über das Konzentrat zurückgewonnen werden. Hierbei wurde der Cross-Flow unter Verwendung von einkanaligen TiO_2 -Membranen mit Porengrößen von 30, 10 und 5 nm durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die höchste stabile Permeabilität bei einer Porengröße der Membran von 10 nm erreicht werden konnte. Dies ist auf eine schnellere Verstopfung der Poren > 10 nm

(durch Ölemulsionen) und starkes Fouling an den Innenwänden der Poren < 10 nm (hauptsächlich durch Tenside) zurückzuführen. Für die weitere Behandlung (Hauptbehandlung) wurden Experimente mit der MD in der Air-Gap Konfiguration durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine stabile Performance der Membran im Langzeitbetrieb von bis zu 36 Tagen und über einen weiten Bereich der Zulauftemperaturen von 30 bis 60 °C (die Kondensattemperatur wurde bei 20 °C gehalten). Die Zulauftemperaturen 50 °C und 60 °C lieferten die beste Kondensatqualität, definiert durch hohe Ammoniumkonzentrationen von bis zu 12 g/L (bei 60 °C Zulauftemperatur) und geringe Kontaminierung durch TOC (total organic carbon), basierend auf dem höchsten NH₄+/TOC-Verhältnis von 13 (bei 50 °C Zulauftemperatur). Da der Fluss mit zunehmender Zulauftemperatur exponentiell anstieg, wurde 60 °C als optimale Temperatur gewählt, um die Studie zur Ausbeute von Membran/Kondensat auf 80 % zu erweitern. Aufgrund von Beobachtungen und verschiedenen Analysemethoden zeigte sich, dass eine Benetzung der Membran oberhalb von 60 % Ausbeute unvermeidlich war. Die Ursache wurde dem organischen Fouling zugeschrieben, hauptsächlich verursacht durch die Adsorption von Tensiden an der Membranoberfläche. Dies verringert die Hydrophobie der Membran und führt schließlich zu einer fortschreitenden Benetzung der Membran bei 80 % Ausbeute.

Die Arbeit ist im Jahr 2022 in der Schriftenreihe Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie erschienen und ist über das Sekretariat des Lehrstuhls erhältlich (Band 85).

Im Juli 2022 verteidigte Herr M. Sc. **Michael Sturm** seine Dissertation mit dem Titel "Microplastics removal from water with organosilanes" (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hermann Nirschl).

In den letzten Jahren hat sich Mikroplastik als allgegenwärtig in der aquatischen Umwelt gezeigt. Methoden und Materialien zur effizienten Entfernung von Mikroplastik aus Gewässern sind damit von zentralem Forschungsinteresse. Anwendungsgebiete sind die Behandlung von kommunalen und industriellen Abwässern sowie Oberflächenabfluss von Städten oder Straßen, mit dem Ziel, Mikroplastikeinträge in die Umwelt zu vermeiden. Bei dem in der Promotion untersuchten neuartigen Verfahren lagern sich Organosilane an die Mikroplastikoberfläche an und sammeln dieses in großen Agglomeraten, welche in einem wasserinduzierten Sol-Gel-Prozess chemisch gebunden werden. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war, dieses neue Verfahren zu optimieren. Darüber hinaus sollte die Detektion von Mikroplastik über Fluoreszenzfarbstoffe untersucht werden.

Zunächst wurde eine Anzahl von Organosilanen auf die Eignung zur Entfernung von Mikroplastik getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die unterschiedlichen Alkylgruppen einen starken Einfluss auf die Eignung der Alkyltrichlorosilane zur Agglomeration und Fixierung von Mikroplastik haben, da sie die Hydrolyse- und Kondensationskinetik sowie die Affinität zum Mikroplastik beeinflussen. Am besten geeignet für die Entfernung von Mikroplastik sind Kettenlängen zwischen 3 und 5 C-Atomen.

Tabelle 3.1: In Arbeit befindliche, im Jahre 2022 abgeschlossene* und neu begonnene Forschungsprojekte.

Schwerpunkt	Projektmitarbeiter:innen	Thema	Förderung
Wasserqualität	Amélie Chabilan Ewa Borowska	Verhalten von Antibiotika in Flüssen und Flusssedimenten und ihre Auswirkungen auf die Ausbreitung der Antibiotika- resistenzen in der natürlichen Umwelt*	Baden-Württemberg Stiftung, KIT
	Marta Gmurek	Abbau von Antibiotikaresistenzgenen (ARG) mit Hilfe der Photokatalyse*	Alexander von Humboldt Stiftung, KIT
	Steffen Hertle (externer Doktorand)	Aerob metabolischer Chlorethenabbau in kontaminiertem Grundwasser	DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW)
	Lucas Lesmeister (externer Doktorand)	Aufbereitungsverfahren zur Entfernung kurzkettiger per- und polyfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) aus Trinkwasser und Membrankonzentraten	TZW
	Hessam Addin Nadernia Ewa Borowska	Synthese von Nanophotokatalysatoren zur Entfernung von Mikroverunreinigungen aus Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht*	Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD), KIT
	Ulrike Scherer Harald Horn	Systematische Überwachung von SARS-CoV-2 im Abwasser (ESI-Cora; Verbundprojekt)	Europäische Union, Soforthil- feinstrument ESI (Emergency Support Instrument)
	Tim Schwarzenberger (externer Doktorand)	Verifizierung und Optimierung eines kombiniert variablen Ansatzes zur mikrobiologischen Validierung von mono- und polychromatischen UV-Systemen	TZW
	Lara Stelmaszyk (externe Doktorandin)	Methodenentwicklung für die Quantifizierung von Antibio- tikaresistenzgenen anhand PCR-basierter Verfahren und Kulturverfahren*	TZW
	Stephan Zimmermann Ewa Borowska	Verhalten von Krebsmedikamenten bei Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung	KIT
Wasser- technologie	Mehran Aliaskari Yair Morales Prantik Samanta Vasco Welter Florencia Saravia Michael Wagner	PtX-Wind – Offshore Power-to-X-Prozesse, Technologie- plattform H ₂ Mare (Verbundvorhaben)	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
	Yair Morales Florencia Saravia	Transferwind-H ₂ Mare – Forschungs-Transfer, Technologie- plattform H ₂ Mare (Verbundvorhaben)	BMBF
	Max Hackbarth Jonas Ullmann	Einsatz einer mikrobiellen Elektrolysezelle auf Basis eines Scheibentauchkörpers zur nachhaltigen Wasserstoffproduk- tion aus Urin auf der BUGA 2023 (PeePower TM ; Verbundvorha- ben)	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
	Andreas Netsch Michael Wagner	Entwicklung und Demonstration einer energieeffizienten bioelektrochemischen Abwasserbehandlung im technischen Maßstab mit Einhaltung gesetzlicher Anforderungen zur Ablaufqualität (Demo-BioBZ; Verbundprojekt)	BMBF
	Giorgio Pratofiorito Florencia Saravia	Entwicklung einer ressourcen- und kosteneffizienten Prozesskette zur dezentralen Produktion von LNG auf der Basis innovativer Konversions-, Power-to-Gas- und Gasaufbereitungsverfahren (ProBioLNG; Verbundprojekt)	BMBF
	Prantik Samanta Florencia Saravia	Komplettaufbereitung von Gülle und Gärresten unter Berücksichtigung regionaler Stoffstromkonzepte für Nähr- und Schadstoffe (KompaGG-N; Verbundprojekt)	BMBF
	Ali Sayegh Florencia Saravia	Verarbeitung hydrothermaler Verflüssigungsprodukte mit Membrantechnologien (Verbundprojekt)*	Europäische Kommission
	Michael Sturm	Mikroplastikfreie Meersalzgewinnung – Entwicklung eines methodologischen und technologischen Verfahrens zur Reduktion der Mikroplastikbelastung bei der Meersalzge- winnung*	Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) – Zentrales Innovationspro- gramm Mittelstand

Biologische Abwasser- reinigung	Nikhil Shylaja Prakash Andrea Hille-Reichel	Kommunales Abwasser als Quelle für Ammoniumstickstoff, Wasserstoff und Bioplastik – die Bioraffinerie Büsnau (KoalAplan; Verbundprojekt)	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg, kofinanziert von der Europäischen Union
Biologische Grenzflächen	Szilárd Bucs	Visualisierung und Bildanalyse von Biofilmen in verschiedenen Umgebungen, Computergestützte Strömungsdynamik und multiphysikalische Modellierung	Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts, BMBF, KIT
	Rui Du	Kombination anaerober Ammoniumoxidation (Anammox) und partieller Denitrifikation in Biofilmverfahren	Alexander von Humboldt Stiftung, KIT
	Süheyla Duran Andrea Hille-Reichel	Anwendung von Membran-Biofilmreaktoren für die biotechnologische Produktion von Plattformchemikalien	The Republic of Türkiye Minis- try of National Education, KIT
	Na Li Harald Horn	Prozess der Biofilmentwicklung und Sukzession mikrobieller Gemeinschaften in Wasserverteilungssystemen	Chinese Scholarship Council (CSC), KIT
	Maximilian Miehle Andrea Hille-Reichel	Kontinuierliche Bioproduktion mit maßgeschneiderten Bio- katalysatoren in bioelektrochemischen Fermentern (Conti- Bio-Elect; Verbundprojekt)	BMBF
	Johannes Reiner Max Hackbarth Andreas Netsch Andrea Hille-Reichel	Reaktionskaskaden zur Produktion von Biopolymeren aus Abfallstoffströmen (BROWSE; Verbundprojekt)	BMBF

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass eine starke Wechselwirkung zwischen der organischen Gruppe des Organosilans und der Oberfläche des Polymers stattfindet. Eine zunehmende Polarität von Mikroplastik wirkt sich negativ auf den Entfernungsprozess mit Organosilanen mit unpolaren organischen Gruppen aus. Durch Erhöhung der Polarität der organischen Gruppe oder Verwendung höherer Konzentrationen von Organosilanen können hochpolare Polymere effizient entfernt werden. Dies zeigt, dass Organosilane an die Oberflächenchemie bestimmter Polymertypen angepasst werden können, um diese effizienter zu entfernen. Da Mikroplastik in der Umwelt in der Regel von Biofilmen bedeckt ist, wurde dessen Einfluss auf die Entfernung im dritten Teil der Promotion analysiert. Für eine beschleunigte Biofilmkultivierung wurde eine mit Mikroplastik gefüllte Festbettsäule entwickelt und getestet, die von biologisch aufbereiteten kommunalen Abwässern, angereichert mit Glucose, durchströmt wurde. Der Biofilm auf den Mikroplastikpartikeln wurde neben anderen bildgebenden Verfahren mit konfokaler Laser-Scanning-Mikroskopie (CLSM) charakterisiert. Die Ergebnisse zeigten eine partielle Biofilmbedeckung des Mikroplastiks nach sieben Tagen Inkubation. Damit wurde erstmals eine Methode zur schnellen und standardisierbaren Biofilmkultivierung auf Mikroplastik entwickelt. Um anschließend den Effekt von Biofilmbewuchs auf die Mikroplastikentfernung zu untersuchen, wurde in den Säulen Biofilm auf Mikroplastik fünf verschiedener Polymertypen kultiviert. Die Ergebnisse bestätigten, dass der Biofilmbewuchs den Entfernungsprozess beeinflusst und zu einer verringerten Entfernungseffizienz führt.

Trotz intensiver Forschung steht noch immer keine kostengünstige und einfach anwendbare Methode zum Nachweis von Mikroplastik zur Verfügung. Das Anfärben von Mikroplastik mit Nilrot hat großes Potenzial, da die einzige Voraussetzung ein Gerät für Fluoreszenzaufnahmen ist. Zur Verbesserung des Verfahrens wurden

Nilrot und drei neu entwickelte Derivate mit dem Ziel getestet, eine höhere Selektivität für Kunststoffpartikel und eine intensivere Fluoreszenz zu erreichen. Eine Kombination aus Nilrot und einem neuen Nilrot-Derivat, modifiziert mit einer Ethylhexylgruppe, gelöst in Wasser bei pH 2,5, erwies sich als am effizientesten zur Unterscheidung von Kunststoffen und natürlichen Partikeln. Da die Selektivität noch nicht hoch genug ist, um falsche Positivbefunde durch natürliche Polymere wie Chitin zu vermeiden, ist weiterhin eine zeitaufwändige Probenvorbereitung erforderlich. Im Juli 2022 verteidigte Herr M. Sc. **Prantik Samanta** seine Dissertation mit dem Titel "Pig manure treatment by membrane filtration" (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Tobias Morck (Universität Kassel)).

Die intensive Viehhaltung wirkt sich negativ auf die Umwelt aus, da sie zur Freisetzung von Ammoniak und Lachgas, zur Nitratbelastung des Grundwassers und zur Eutrophierung von Oberflächengewässern beiträgt. Darüber hinaus gelten die Tierhaltung und Produktion von Biogas aus Gärresten als eines der größten Genreservoirs für Antibiotikaresistenzen, die sich zu einer der großen Bedrohungen für die menschliche Gesundheit weltweit entwickeln und bis 2050 voraussichtlich 10 Mio. Menschen das Leben kosten wird.

Ziel der Dissertation war es, die durch die Viehwirtschaft verursachte Stickstoffverschmutzung zu quantifizieren und anschließend die Nährstoffrückgewinnung und die Entfernung von Antibiotikaresistenzgenen (ARGs) aus Gülle durch den Einsatz von Mikrofiltration (MF) und Nanofiltration (NF) zu untersuchen.

Für die Fleischproduktion wurde nachgewiesen, dass sich die Beziehung zwischen der Gesamtstickstoffaufnahme und dem entsprechenden Stickstoffverlust pro kg Fleischproduktion linear verhält. Der durchschnittliche Stickstoffverlust wurde mit 150 g je kg Geflügelfleischproduktion berechnet. Dieser Wert erhöhte sich auf

durchschnittlich 180 und 350 g pro kg Schweine- und Rindfleischproduktion. Schließlich wurde festgestellt, dass 7 kWh Energie erforderlich sind, um den gesamten Ammoniumstickstoff aus Rinderdünger pro 1 kg Fleischproduktion zurückzugewinnen, wenn der Ansatz der Nulleinleitung (zero liquid discharge) berücksichtigt wird. Für die Stickstoffrückgewinnung wurde die Effizienz der MF gefolgt von einer Vakuumdestillation (VE) zur Herstellung von Ammoniakwasser bewertet. Die MF-Ergebnisse zeigten, dass die suspendierten Feststoffe (TSS) zu über 98 % entfernt werden. Der Entfernung von chemischem Sauerstoffbedarf (CSB) und von Gesamtphosphor (Tot-P) lagen bei über 80 %. Fast 80 % des Ammoniumstickstoffs (NH₄+-N) wurden anschließend mit der VE aus dem MF-Permeat zurückgewonnen. Die VE des MF-Permeats erzielte eine NH_4^+ -N Kondensatkonzentration von 31 g/L.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Güllefiltration mittels einer Kombination aus MF und NF nährstoffreiche separate Ströme in geringeren Mengen erzeugt. MF entfernte TSS zu über 98 %. Die CSB- und Tot-P Retentionen lagen bei über 60 bzw. 80 % in einem reduzierten Volumen, das 40 % des ursprünglichen MF-Zufuhrvolumens ausmachte. Die NF (NF270) des MF-Permeats zeigte die vielversprechendsten Ergebnisse, indem insgesamt 50 und 70 % von Gesamtstickstoff (TN) und von Kalium (K) in einem weiter reduzierten Volumen konzentriert wurden. Schließlich wurden insgesamt 189 ARGs in Rohgülle- und Gärrestproben identifiziert und quantifiziert. Die höchste gemessene ARG-Kopienzahl in einer einzigen Gülleprobe wurde mit 1,15 × 108 Kopien/100 μL festgestellt. Die absoluten Konzentrationen von 37 ARGs lagen bei über 105 Kopien/100 μL. Hochkonzentrierte ARGs (mit Ausnahme von aminoglykosidresistenten ARG) in Futtermitteln wiesen nach dem MF-NF-Behandlungsprozess einen hohen log-Retentionswert (LRV) von 3 bis 5 auf. Darüber hinaus wurde ein LRV von unter 2 festgestellt, wenn die anfänglichen absoluten ARGs-Konzentrationen ≤ 10³ Kopien/100 μL waren. Die ARGs-Entfernung scheint

direkt proportional zu ihrer Ausgangskonzentration zu sein. Folglich konnten einige ARGs (tetH, strB) mit bis zu 104 Kopien/100 µL noch im Permeat der NF gefunden werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Promotion, dass die MF-NF Behandlung in der Lage ist, partikel- und pathogenfreies Produktwasser zu produzieren. Dieses könnte in landwirtschaftlichen Betrieben zum Waschen von Ställen oder zur ortsnahen Bewässerung wiederverwendet oder je nach Bedarf auf bestimmten Feldern eingesetzt werden.

Im Dezember 2022 verteidigte Herr Dipl.-Ing. Fabian Brunner seine Dissertation mit dem Titel "Auswirkungen von Abwasserpartikeln auf den Betrieb von Reaktoren mit aeroben Granula bei der kommunalen Abwasserreinigung" (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Tobias Morck (Universität Kassel)). Kaum ein anderes Verfahren hat unser Verständnis der biologischen Abwasserreinigung in den letzten zwei Jahrzehnten so stark beeinflusst wie die aeroben Granula. Das liegt im Wesentlichen an zwei Dingen:

- Die Organisation der an der Abwasserreinigung beteiligten Mikroorganismen in Form von kompakten Granula ist neuartig;
- Alle Eliminationsschritte (C, N, P) laufen nahezu parallel auf der Mikrometerskala in einem Granulum ab.

In der Tat liegt aber ein großer Teil des zu eliminierenden organischen Kohlenstoffs im kommunalen Abwasser partikulär vor. Diese Partikel werden dann beim Belebungsverfahren in den Schlammflocken eingefangen und allmählich über einen Zeitraum von rund zehn Tagen hydrolysiert. Die sehr kompakten aeroben Granula bieten dagegen wenig Chancen für die Anlagerung der partikulären Schmutzfracht. Vor diesem Hintergrund wurde in der Arbeit untersucht, wie aerobe Granula mit den

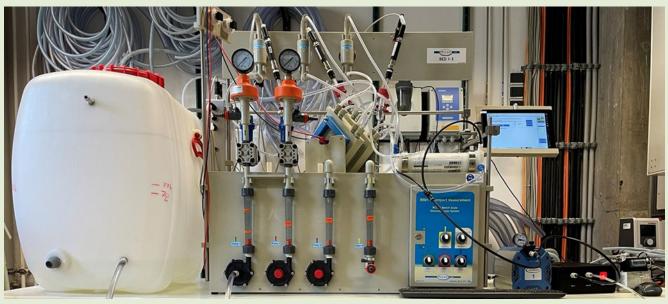


Bild 3.2: Versuchsaufbau der Elektrodialyse mit bipolaren Membranen (BPMED).

Abwasserpartikeln interagieren und ob es überhaupt zu einem Abbau des organischen Kohlenstoffs aus diesen Partikeln kommt. Im ersten Teil der Arbeit werden die Daten aus dem Betrieb von Laboranlagen vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass sich der Granuladurchmesser über einen Zeitraum von acht Monaten zusehends erhöhte. Das ist ein nicht zu unterschätzendes Problem, da große Granula bei identischer Biomassekonzentration weniger Oberfläche zur Verfügung stellen. Die Raumbelastung (1 bis 1,5 kg CSB/(m³d)) war im vorliegenden Fall in der Tat so gewählt, dass Herr Brunner mit dem Laborsystem sehr gute Eliminationsgrade für C, N und P erzielte.

Im zweiten Teil werden die Ergebnisse aus Absetzversuchen von Granula und Belebtschlamm allein und in einer eins-zu-eins Mischung aus Granula/Belebtschlamm gezeigt. Dazu muss bemerkt werden, dass die Granula typischerweise so hohe Sinkgeschwindigkeiten haben, dass die Absetzzeit im Vergleich zu Belebtschlammflocken von 2 h auf unter 15 min reduziert werden kann. Dadurch kann Reaktorvolumen gespart werden. Mit den Versuchen konnte nun gezeigt werden, dass zwar die Absetzzeit vom Granulierungsgrad abhängt – je höher der Anteil der Granula, desto schneller nimmt bei der Sedimentation die Biomassekonzentration in der Bulkphase ab – aber tatsächlich verblieben nach 20 min deutlich mehr Feststoffe (Biomasse) in der Flüssigphase.

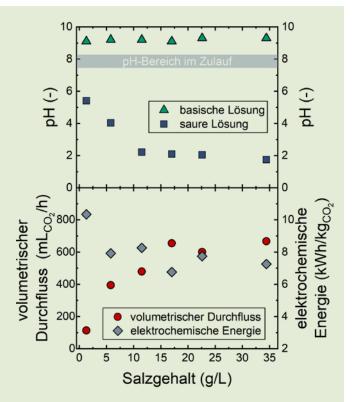


Bild 3.3: Auswirkungen des zunehmenden Salzgehalts des Wassers auf (oben) den pH-Wert des sauren und des basischen Flusses nach 60 Minuten und (unten) die volumetrische Durchflussrate von ${\rm CO_2}$ und die erforderliche elektrochemische Energie.

Um der Interaktion Granula – Partikel näher zu kommen, wird in der Promotion die Mikroelektrodentechnik genutzt. Reale Abwasserpartikel wurden auf einem heterotrophen Biofilm und auf einem Granulum abgelagert und die Sauerstoffatmung mit Mikroelektroden vor und während der Ablagerung gemessen.

Experimentell sind diese Versuche zweifellos eine große Herausforderung, da neben den Mikroelektroden auch noch die optische Kohärenztomographie eingesetzt wird, um die abgelagerten Partikel zu visualisieren und quantitativ zu erfassen. Dabei ergaben sich sehr gute Aufnahmen. Die Messungen zeigen letztendlich, dass es zu keiner relevanten Umsetzung von freigesetztem organischem Kohlenstoff aus den abgelagerten Partikeln kommt. Bei den bekannten Hydrolyseraten war dieses Ergebnis zu erwarten. Trotzdem ist der Wert der hier vorgelegten Ergebnisse nicht zu unterschätzen. Nach wie vor wird die Hydrolyse von kolloidal (partikulär) vorliegendem organischen Substrat in aeroben Granula mit Stärke als Surrogat vermessen. Das ist überhaupt nicht zielführend, da der Ansatz weit entfernt von realen Abwasserpartikeln ist. Die sich verändernden Sauerstoffprofile bei der Anlagerung von Abwasserpartikeln gehen ausschließlich auf die Diffusionslimitierung des Sauerstofftransports durch die abgelagerte Schicht zurück.

In den letzten beiden Abschnitten der Arbeit wird die Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff aus realen Abwasserpartikeln für die aeroben Granula über einen Zeitraum von drei und sechs Wochen dokumentiert. Es konnte gezeigt werden, dass keine nennenswerten Mengen an organischem Kohlenstoff aus der realen partikulären Abwasserfracht verfügbar gemacht werden können. Die Promotionsarbeiten von Herrn Sturm und Herrn Samanta werden im Jahr 2023 in der Schriftenreihe veröffentlicht werden (Bände 86 bis 87). Alle Promotionsarbeiten sind auch elektronisch über die KIT-Bibliothek verfügbar.

3.2 In Arbeit befindliche, im Jahre 2022 abgeschlossene* und neu begonnene Forschungsprojekte

Die 2022 in den Forschungsschwerpunkten Wasserqualität, Wassertechnologie, Biologische Abwasserreinigung und Biologische Grenzflächen bearbeiteten Projekte sind in **Tabelle 3.1** aufgeführt. Im Folgenden werden zwei Projekte ausführlicher vorgestellt. Sie befassen sich mit dem **Wassermanagement in Offshore Power-to-X-Prozessen** und dem **Verhalten von Antibiotika in der aquatischen Umwelt**.

CO₂-Gewinnung aus Wasser durch bipolare Membran-Elektrodialyse (BPMED) für Off-Shore Power-to-X Prozesse – H₂Mare PtX-Wind

Mehran Aliaskari, Florencia Saravia; Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF 03HY302G)

Die Rückgewinnung von CO_2 aus Luft, Wasser oder anderen großen Emissionsquellen spielt eine wichtige Rolle bei der Erreichung der Kohlenstoffneutralität. In Kombination mit grünem Wasserstoff kann das Produkt CO_2 in Power-to-X-Prozessen zur Herstellung von Kraftstoffen und Kohlenwasserstoffen verwen-

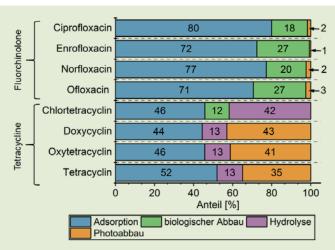


Bild 3.4: Anteile am Verbleib der Antibiotikaklassen Fluorchinolone und Tetracycline für Adsorption (blau), biologischen Abbau (grün), Hydrolyse (lila) und Photoabbau (orange) in der Mesokosmosstudie. Bild modifiziert aus Chabilan et al., 2023 [4].

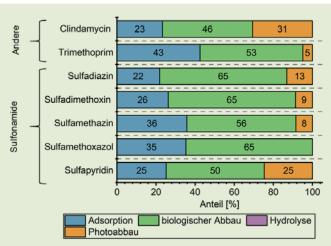


Bild 3.5: Anteile am Verbleib der Antibiotikaklassen Andere und Sulfonamide für Adsorption (blau), biologischen Abbau (grün) und Photoabbau (orange) in der Mesokosmosstudie. Für die Hydrolyse konnte kein Beitrag ermittelt werden. Bild modifiziert aus Chabilan et al., 2023 [4].

det werden, um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen. Meerwasser ist aufgrund der Löslichkeit und des Austauschs von CO_2 zwischen der Atmosphäre und dem Ozean eine bedeutende Quelle von CO_2 in Form von gelöstem, anorganischen Kohlenstoff (DIC). Durch den Einsatz eines bipolaren Membran-Elektrodialyse(BP-MED)-Systems ist es möglich, das Speisewasser anzusäuern [1]. Durch diese Ansäuerung wird Hydrogencarbonat im Wasser in gelöstes CO_2 -Gas umgewandelt, und das gelöste CO_2 -Gas kann durch einen Membrankontaktor extrahiert werden.

Um die Mechanismen der CO₂-Extraktion aus Wasser zu erforschen, wurden Experimente mit verschiedenen Wasserqualitäten und Betriebsbedingungen durchgeführt. Es wurde ein Laboraufbau mit bipolaren und mit Anionenaustauscher-Membranen (fünf saure und fünf basische Zellen, 10 x 10 cm²) verwendet. Das CO₂ wurde mithilfe eines kommerziellen Membrankontaktors und einer Vakuumpumpe aus der sauren Lösung gewonnen (Bild 3.2). Das extrahierte Gas wurde gemessen (MilliGascounter®) und analysiert (Gaschromatographie), während die Auswirkungen des Salzgehalts des Wassers, der Flussrate, der angelegten Spannung und eines neuen Redoxsystems untersucht wurden.

Der pH-Wert der sauren und basischen Lösungen, die volumetrische Durchflussrate des $\mathrm{CO_2}$ -Gases und die erforderliche spezifische elektrochemische Energie sind in **Bild 3.3** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es bei einer angelegten Spannung von 15 V nicht möglich war, bei niedrigeren Salzgehalten einen Säuregrad unter pH 4 zu erreichen. Ein pH-Wert unter 4 ist erforderlich, um das Gleichgewicht des anorganischen Kohlenstoffs zu gelöstem $\mathrm{CO_2}$ (g) zu verschieben; daher war der $\mathrm{CO_2}$ -Volumenstrom geringer. Wenn der pH-Wert des sauren Stroms bei höheren Salzgehalten sinkt, verschiebt sich der gelöste anorganische Kohlenstoff (vorwiegend Hydrogencarbonat) zu $\mathrm{CO_2}$ (g), und es wurde ein Anstieg der volumetrischen Flussrate beobachtet [2]. Um den pH-Wert des sauren Stroms bei niedrigen Salzgehalten weiter zu senken, kann die

angelegte Spannung erhöht werden, was jedoch den Energieaufwand weiter erhöht. Bei einem Salzgehalt von über 15 g/L spielte der Salzgehalt keine große Rolle, so dass der Energieverbrauch des BPMED-Systems stabil war und bei etwa 7 kWh/kg CO₂ lag. Der gemessene elektrochemische Energieverbrauch ist höher als bei anderen verfügbaren Technologien (Direct Air Capture (DAC) verbraucht z. B. 1,5 bis 3 kWh/kg CO₂) [3].

Weitere Untersuchungen sind für die Optimierung des BPMED-Prozesses erforderlich.

- [1] Eisaman, M. D.; Alvarado, L.; Larner, D.; Wang, P.; Littau, K. A.: CO₂ desorption using high-pressure bipolar membrane electrodialysis. Energy & Environmental Science 4(10) (2011), S. 4031-4037, DOI: 10.1039/C1EE01336J.
- [2] Sharifian, R.; Wagterveld, R.; Digdaya, I.; Xiang, C.; Vermaas, D.: Electrochemical carbon dioxide capture to close the carbon cycle. Energy & Environmental Science 14(2) (2021), S. 781-814, DOI: 10.1039/D0EE03382K.
- [3] Keith, D. W.; Holmes, G.; Angelo, D. S.; Heidel, K.: A process for capturing CO₂ from the atmosphere. Joule 2(8) (2018), S. 1573-1594, DOI: 10.1016/j. joule.2018.05.006.

Untersuchung zum Verbleib und Verhalten von Antibiotika in der aquatischen Umwelt mit einer Mesokosmos-Studie

Amélie Chabilan, Ewa Borowska; Förderung: Baden-Württemberg Stiftung

Antibiotika werden in der Human- und Veterinärmedizin gegen bakterielle Infektionen verschrieben. Durch behandeltes kommunales, landwirtschaftliches oder industrielles Abwasser werden die Antibiotika in die aquatische Umwelt z. B. in Flüsse, Bäche oder Seen eingetragen. Ein weiterer Eintragspfad ist der Abfluss von Gülle, die als Dünger auf landwirtschaftlich bewirtschaftete Fläche aufgetragen wird. Der Verbleib der Antibiotika in der aquatischen Umwelt wird durch die Adsorption am Sedi-

ment, den Abbau durch Mikroorganismen (biologischer Abbau), die Reaktion mit Wasser (Hydrolyse) oder die Zersetzung durch Licht (Photoabbau) bestimmt. Im Rahmen des Projektes sollte das Umweltverhalten von 18 Antibiotika durch eine Mesokosmosstudie ermittelt werden. Ein Mesokosmos stellt ein aquatisches Modellökosystem dar und ermöglicht, das Verhalten von Chemikalien unter reproduzierbaren und umweltähnlichen Bedingungen zu untersuchen.

Der Versuchsaufbau bestand aus fünf Batch-Reaktoren (10 L Fassungsvermögen), die mit Flusssediment (2 L) und Leitungswasser (8 L) gefüllt waren. In jedem Reaktor wurden unterschiedliche Bedingungen eingestellt, um die potenziellen Beiträge der vier genannten Prozesse zu ermitteln (für Details siehe [4]). Zu Beginn des Experiments wurde eine Mischung aus 18 Antibiotika, die den Klassen der Fluorchinolone, Makrolide, Sulfonamide und Tetracycline angehören, in vier Mesokosmen gegeben. Der fünfte Mesokosmos diente als Kontrolle (keine Zugabe von Antibiotika). Anschließend wurde über einen Zeitraum von sechs Wochen die Konzentration an Antibiotika mittels der zuvor entwickelten analytischen Methode bestehend aus der Flüssigkeitschromatographie gekoppelt mit der Tandem Massenspektrometrie (Details siehe [5]) in der Wasserphase bestimmt. Durch die gemessene Konzentrationsabnahme in der Wasserphase konnten im Anschluss die Abbaukinetiken für jedes Antibiotikum bestimmt werden.

Die Kinetik entsprach einer Reaktion erster Or dnung. Zusätzlich wurden die Halbwertszeiten, die angeben, nach welcher Zeit die Konzentration des Antibiotikums um die Hälfte reduziert wurde, für jeden Mesokosmos und Prozess bestimmt. Da die genannten Prozesse in der aquatischen Umwelt parallel ablaufen, erlaubte die Halbwertszeit eine Aussage darüber, wie lange die Antibiotika in der Wasserphase der aquatischen Umwelt verbleiben. Fluorchinolone und Tetracycline wiesen kurze Halbwertszeiten von zwei bis acht Tagen auf. Für die Sulfonamide wurden hingegen höhere Halbwertszeiten von 19 bis 47 Tagen ermittelt.

Das Verhalten jeder Antibiotikaklasse wurde von verschieden Prozessen bestimmt. Für die Fluorchinolone und Tetracycline war die Adsorption am Sediment der Prozess mit den höchsten Anteilen (44 bis 80 %, siehe Bild 3.4). Der Anteil des biologischen Abbaus fiel für beide Antibiotikaklassen mit 12 bis 27 % gering aus. Die Hydrolyse trat nur bei den Tetracyclinen mit 13 bis 42 % auf. Der Photoabbau hatte einen höheren Anteil bei den Tetracyclinen (35 bis 43 %) als bei den Fluorchinolonen (1 bis 3 %). Für die Sulfonamide, Clindamycin und Trimethoprim war der biologische Abbau der Prozess mit den höchsten Anteilen (46 bis 65 %, siehe Bild 3.5). Darauf folgte die Adsorption mit 23 bis 43 % und der Photoabbau mit 5 bis 31 %. Das Verhalten der Antibiotika wurde mit ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften begründet, und somit konnte ein direkter Zusammenhang zur Adsorptionsaffinität, der chemischen Struktur und dem Absorptionsmaximum hergestellt werden (für Details siehe [4]). Für die Makrolide wurde hingegen ein entgegengesetztes Verhalten beobachtet. Ihre Konzentration nahm in den Mesokosmen über den Zeitraum von sechs Wochen nicht ab. Folglich weisen Makrolide ein persistentes Verhalten in der Wasserphase der aquatischen Umwelt auf.

Die Mesokosmosstudie zeigte, dass die Adsorption und der biologische Abbau den Verbleib der Antibiotika in der aquatischen Umwelt maßgeblich beeinflussen. Darüber hinaus wiesen Antibiotika derselben Klasse ein ähnliches Verhalten auf. Clindamycin, die Makrolide, die Sulfonamide und Trimethoprim persistierten in der Wasserphase. Hingegen waren die Fluorchinolone und Tetracycline nicht persistent in der Wasserphase.

- [4] Chabilan, A.; Barajas Ledesma, D. G.; Horn, H.; Borowska, E.: Mesocosm experiment to determine the contribution of adsorption, biodegradation, hydrolysis and photodegradation in the attenuation of antibiotics at the water sediment interface. Science of the Total Environment (2023) 161385, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161385.
- [5] Chabilan, A.; Landwehr, N.; Horn, H.; Borowska, E.: Impact of log(Kow) value on the extraction of antibiotics from river sediments with pressurized liquid extraction. Water 14 (16) (2022) 2534, DOI: 10.3390/w14162534.

3.3 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen in "peer-reviewed" Fachjournalen und Buchbeiträge:

- Ali, R.; Saravia, F.; Hille-Reichel, A.; Härrer, D.; Gescher, J.; Horn, H.: Enhanced production of propionic acid through acidic hydrolysis by choice of inoculum.

 Journal of Chemical Technology & Biotechnology 96 (1) (2021), S. 207-216, DOI: 10.1002/jctb.6529.
- Balbierer, R.; Seegert, P.; Herberger, S.; Wetzel, T.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Investigation of transverse relaxation rate distribution via magnetic resonance imaging: Impact of electrode formation. Energy Technology 9 (6) (2021) 2000579. DOI: 10.1002/ente.202000579.
- Bucs, S. Sz.; Farhat, N.; Fortunato, L.: Water Treatment Process, Editorial. Membranes 12(5) (2022) 543, DOI: 10.3390/membranes12050543.
- Dueholm, M. K. D.; Nierychlo, M.; Andersen, K. S.; Rudkjøbing, V.; Knutsson, S.; Arriaga, S.; Bakke, R.; Boon, N.; Bux, F.; Christensson, M.; Chua, A. S. M.; Curtis, T. P.; Cytryn, E.; Erijman, L.; Etchebehere, C.; Fatta-Kassinos, D.; Frigon, D.; Garcia-Chaves, M. C.; Gu, A. Z.; Horn, H.; Jenkins, D.; Kreuzinger, N.; Kumari, S.; Lanham, A.; Law, Y.; Leiknes, T. O.; Morgenroth, E.; Muszyński, A.; Petrovski, S.; Pijuan, M.; Pillai, S. B.; Reis, M. A. M.; Rong, Q.; Rossetti, S.; Seviour, R.; Tooker, N.; Vainio, P.; Loosdrecht, M. van; Vikraman, R.; Wanner, J.; Weissbrodt, D.; Wen, X.; Zhang, T.; Nielsen, P. H.; Albertsen, M.; Nielsen, P. H.; Consortium, M. G.: MiDAS 4: A global catalogue of full-length 16S rRNA gene sequences and taxonomy for studies of bacterial communities in wastewater treatment plants. Nature Communications 13 (2022) 1908, DOI: 10.1038/s41467-022-29438-7.
- Gierl, L.; Horn, H.; Wagner, M.: Impact of Fe²⁺ and shear stress on the development and mesoscopic structure of biofilms—A *Bacillus subtilis* case study. Microorganisms 10 (11) (2022) 2234, DOI: 10.3390/microorganisms10112234.
- Gmurek, M.; Borowska, E.; Schwartz, T.; Horn, H.: Does light-based tertiary treatment prevent the spread of antibiotic resistance genes? Performance, regrowth and future direction. Science of the Total Environment 817 (2022) 153001, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153001.
- Gretzinger, S.; Schmieg, B.; Guthausen, G.; Hubbuch, J.: Virtual reality as tool for bioprinting quality inspection: a proof of principle. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 10 (2022) 895842, DOI: 10.3389/fbioe.2022.895842.
- Haas, S.; Schmieg, B.; Wendlich, P.; Guthausen, G.; Hubbuch, J.: Magnetic resonance imaging: time-dependent wetting and swelling behavior of an auxetic hydrogel based on natural polymers. Polymers 14 (22) (2022) 5023, DOI: 10.3390/polym 14225023.
- Junker, F.; Michalski, K.; Guthausen, G.; Bunzel, M.: Characterization of covalent, feruloylated polysaccharide gels by pulsed field gradient-stimulated echo

- (PFG-STE)-NMR. Carbohydrate Polymers 267 (2021) 118232, DOI: 10.1016/j. carbpol.2021.118232.
- Kaysan, G.; Kräling, R.; Meier, M.; Nirschl, H.; Guthausen, G.; Kind, M.: Investigation of the surfactant distribution in oil-in-water emulsions during the crystallization of the dispersed phase via nuclear magnetic resonance relaxometry and diffusometry. Magnetic Resonance in Chemistry 60 (12) (2022), S. 1131-1147, DOI: 10.1002/mrc.5305.
- Kaysan, G.; Rudszuck, T.; Trapp, L.; Balbierer, R.; Kind, M.; Guthausen, G.: [Chapter Two] - Recent applications of NMR diffusion experiments. Annual Reports on NMR Spectroscopy. Ed. Webb, G. A.: (2022), S. 47-93, DOI: 10.1016/bs. arnmr.2022.07.003.
- Kaysan, G.; Schork, N.; Herberger, S.; Guthausen, G.; Kind, M.: Contact-mediated nucleation in melt emulsions investigated by rheo-nuclear magnetic resonance. Magnetic Resonance in Chemistry 60 (7) (2022), S. 615-627, DOI: 10.1002/mrc.5228.
- Klein, E.; Weiler, J.; Wagner, M.; Čelikić, M.; Niemeyer, C. M.; Horn, H.; Gescher, J.: Enrichment of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in a microfluidic model biofilm system by mimicking a typical aerobic granular sludge feast/famine regime. Applied Microbiology and Biotechnology 106 (3) (2022), S. 1313-1324, DOI: 10.1007/s00253-022-11759-8.
- Netsch, A.; Horn, H.; Wagner, M.: On-Line monitoring of biofilm accumulation on graphite-polypropylene electrode material using a heat transfer sensor. Biosensors 12 (1) (2022) 18, DOI: 10.3390/bios12010018.
- Pratofiorito, G.; Horn, H.; Saravia, F.: Differentiating fouling on the membrane and on the spacer in low-pressure reverse-osmosis under high organic load using optical coherence tomography. Separation and Purification Technology 291 (2022) 120885, DOI: 10.1016/j.seppur.2022.120885.
- Ranzinger, F.; Horn, H.; Wagner, M.: Imaging of particle deposition and resulting flow field during flocculation filtration within a granulated activated carbon filter. Separation and Purification Technology 292 (2022) 121033, DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121033.
- Samanta, P.; Horn, H.; Saravia, F.: Removal of diverse and abundant ARGs by MF-NF process from pig manure and digestate. Membranes 12 (7) (2022) 661, DOI: 10.3390/membranes12070661.
- Samanta, P.; Horn, H.; Saravia, F.: Impact of livestock farming on nitrogen pollution and the corresponding energy demand for zero liquid discharge. Water (Switzerland) 14 (8) (2022) 1278, DOI: 10.3390/w14081278.
- Samanta, P.; Schönettin, H. M.; Horn, H.; Saravia, F.: MF–NF treatment train for pig manure: nutrient recovery and reuse of product water. Membranes 12 (2) (2022) 165, DOI: 10.3390/membranes12020165.
- Samanta, P.; Ungern-Sternberg Schwark, L. von; Horn, H.; Saravia, F.: Nutrient recovery and ammonia-water production by MF-vacuum evaporation treatment of pig manure. Journal of Environmental Chemical Engineering 10 (1) (2022), 106929, DOI: 10.1016/j.jece.2021.106929.
- Sayegh, A.; Merkert, S.; Zimmermann, J.; Horn, H.; Saravia, F.: Treatment of hydrothermal-liquefaction wastewater with crossflow UF for oil and particle removal. Membranes 12 (3) (2022) 255, DOI: 10.3390/membranes12030255.
- Sayegh, A.; Shylaja Prakash, N.; Horn, H.; Saravia, F.: Membrane distillation as a second stage treatment of hydrothermal liquefaction wastewater after ultrafiltration. Separation and Purification Technology 285 (2022) 120379, DOI: 10.1016/j.seppur.2021.120379.
- Sayegh, A.; Shylaja Prakash, N.; Pedersen, T. H.; Horn, H.; Saravia, F.: Treatment of hydrothermal liquefaction wastewater with ultrafiltration and air stripping for oil and particle removal and ammonia recovery. Journal of Water Process Engineering 44 (2021) 102427, DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102427.
- Schroers, S.; Eiff, O.; Kleidon, A.; Scherer, U.; Wienhöfer, J.; Zehe, E.: Morphological controls on surface runoff: an interpretation of steady-state energy patterns, maximum power states and dissipation regimes within a thermodynamic framework. Hydrology and Earth System Sciences 26 (12) (2022), S. 3125-3150, DOI: 10.5194/hess-26-3125-2022.
- Sturm, M. T.; Schuhen, K.; Horn, H.: Method for rapid biofilm cultivation on microplastics and investigation of its effect on the agglomeration and removal of

- microplastics using organosilanes. Science of the Total Environment 806 (4) (2022) 151388, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151388.
- Venu, A. C.; Nasser Din, R.; Rudszuck, T.; Picchetti, P.; Chakraborty, P.; Powell, A. K.; Krämer, S.; Guthausen, G.; Ibrahim, M.: NMR relaxivities of paramagnetic lanthanide-containing polyoxometalates. Molecules 26 (24) (2021) 7481, DOI: 10.3390/molecules26247481.
- Xiao, K.; Abbt-Braun, G.; Borowska, E.; Thomagkini, X.; Horn, H.: Solid–liquid distribution of ciprofloxacin during sludge dewatering after Fe(II)-activated peroxymonosulfate treatment: focusing on the role of dissolved organic components. ACS ES&T Engineering 2 (5) (2022), S. 863-873, DOI: 10.1021/acsestengg.1c00402.
- Xiao, K.; Horn, H.; Abbt-Braun, G.: "Humic substances" measurement in sludge dissolved organic matter: A critical assessment of current methods. Chemosphere 293 (2022) 133608, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133608.
- Xiao, K.; Horn, H.; Abbt-Braun, G.: Oversimplification of humic substances results in sewage sludge dissolved organic matter: potential pitfalls of the current presentation and interpretation. ACS ES&T Water 2 (10) (2022), S. 1625-1627, DOI: 10.1021/acsestwater.2c00408.



Autoren
Prof. Dr. rer. nat. Harald Horn
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts
für Technologie (KIT)
Karlsruhe
Tel.: 0721 608-42580
harald.horn@kit.edu
www.ebi.kit.edu



Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
Karlsruhe
Tel.: 0721 608-42561
thomas.kolb@kit.edu
www.ebi.kit.edu



Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts
für Technologie (KIT)
Karlsruhe
Tel.: 0721 608-42570
dimosthenis.trimis@kit.edu
www.ebi.kit.edu

