

**06|2024**

ISSN 0016-3651

Jahrgang 165

B 5399

# SONDERDRUCK

aus gwf Gas + Energie 06/2024 + 07-08/2024 und  
gwf-Wasser|Abwasser 06/2024

Vulkan-Verlag GmbH  
[www.gwf-wasser-abwasser.de](http://www.gwf-wasser-abwasser.de)

## Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2023

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

Harald Horn, Thomas Kolb, Dimosthenis Trimis, Reinhard Rauch, Oliver Stein, Moritz Wolf



# Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2023

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

Harald Horn, Thomas Kolb, Dimosthenis Trimis, Reinhard Rauch, Oliver Stein, Moritz Wolf

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. Im Fokus dieses Berichts steht die Entwicklung der drei Institutsteile – Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie, EBI ceb, Verbrennungstechnik, EBI vbt, und Wasserchemie und Wassertechnologie, EBI WCT – mit Beiträgen aus der universitären Lehre, der Aus- und Weiterbildung, den Forschungs- und Entwicklungsprojekten, der Beratung und Firmenkontakte. Wie auch in den vergangenen Jahren erscheinen die gasspezifischen Beiträge im gwf Gas + Energie (Teil 1: Ausgabe 6/2024, EBI ceb; Teil 2: Ausgabe 7-8/2024, EBI vbt) und die wasserspezifischen Beiträge im gwf-Wasser | Abwasser (Teil 3: Ausgabe 6/2024, EBI WCT).*

## Zur Geschichte und zum Umfeld des EBI

Das Engler-Bunte-Institut (EBI) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 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 verdeutlicht sich darin, dass die Lehrstuhlinhaber 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 innehaben.

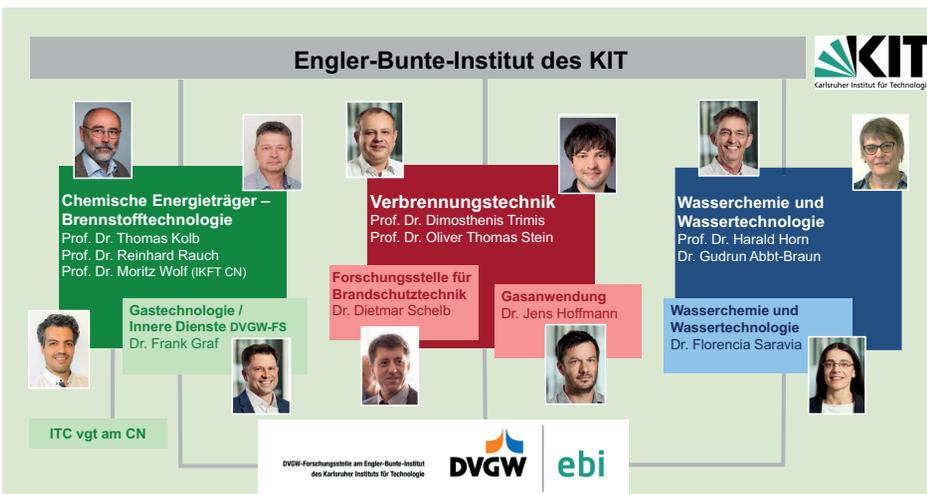
Das KIT ist „Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft“. Die Universitäts-Welt, deren Wurzeln bis ins Jahr 1825 zurückreichen, steht dabei für die Breite der Disziplinen und des Wissens, während sich die Helmholtz-Welt traditionell an den großen und drängenden Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft ausrichtet. Ziel des KIT ist es, mit exzellenter Lehre, Spitzenforschung und Innovation zum Gelingen großer Projekte der Gesellschaft beizutragen. Forschung, Lehre und Innovation am KIT unterstützen die Energiewende und den Umbau des Energiesystems in Deutschland. Klare Prioritäten liegen in den Bereichen Ener-

gieeffizienz und Erneuerbare Energien, Energiespeicher und Netze, Elektromobilität sowie dem Ausbau der internationalen Forschungszusammenarbeit.

Sowohl die Forschungsgruppen am Engler-Bunte-Institut als auch die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut tragen seit Jahren im Rahmen der Forschungs- und Lehrtätigkeit in den Themenfeldern Energie und Umwelt wesentlich zur sehr hohen internationalen Sichtbarkeit des KIT bei. Das aktuelle Organigramm des Engler-Bunte-Instituts ist in **Bild 1** dargestellt.

## Forschung und Beratung am Engler-Bunte-Institut

Sowohl die Forschungsgruppen des EBI als auch die DVGW-Forschungsstelle am EBI konnten 2023 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, Gas-technologie und im Prüflaboratorium Gas bearbeitet. Neben der Förderung durch die öffentliche Hand wird ein erheblicher

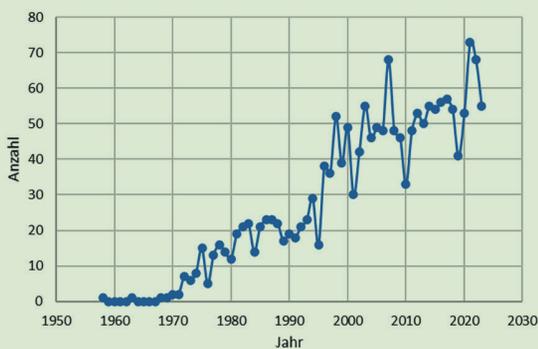


**Bild 1:** Aktuelle Organisationsstruktur des Engler-Bunte-Instituts und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut

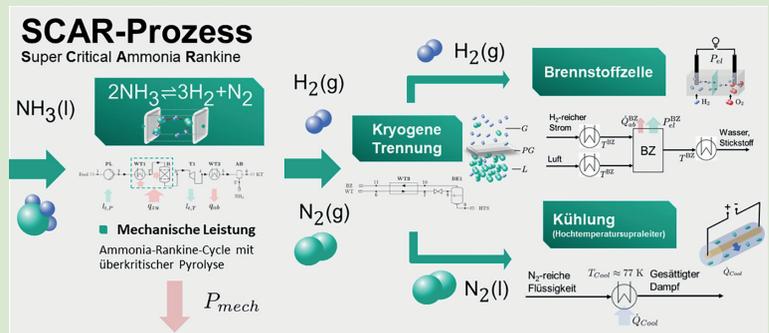


© DVGW/Kurda

**Bild 4:** Anlässlich der gat | wat am 06.09.2023 übergibt der Vizepräsident (Wasser) des DVGW, Herr Christoph Jeromin den DVGW-Studienpreis (Wasser) an Jonas Ullmann



**Bild 2:** Anzahl pro Jahr der in scopus.com gelisteten Publikationen aus dem Engler-Bunte-Institut seit 1958; Scopus.com, 26.03.2024



**Bild 3:** Schematische Darstellung des in der Masterarbeit von Max Deutschmann entwickelten und geschlossen bilanzierten SCAR-Prozesses. In diesem wird flüssiger Ammoniak im überkritischen Zustand zu Wasserstoff und Stickstoff pyrolysiert und in einer Turbine entsprechend eines Rankine-Vergleichsprozesses entspannt. Im Anschluss lässt sich durch ein kryogenes Trennverfahren flüssiger Stickstoff zur Kühlung von Hochtemperatursupraleitern und reiner Wasserstoff zur Verwendung als Brennstoff für bspw. eine Brennstoffzelle nutzen

Anteil unserer Forschung durch Aufträge aus Industrie und Unternehmen finanziert.

Wie in den Jahren zuvor ist die **Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts, GdF**, ein sehr wertvoller Partner, sie unterstützt die Forschung am Engler-Bunte-Institut stets zuverlässig. Umfang und Erfolg unserer Forschungsarbeiten spiegeln sich in der Publikationsaktivität des Engler-Bunte-Instituts wider, die über die letzten sechs Jahrzehnte in **Bild 2** dokumentiert ist.

### Lehre und Ausbildung

Im WS 2023/24 konnten wir im Studiengang Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik 111 Bachelor- und 99 Master-Studierende begrüßen, im Bioingenieurwesen waren dies 73 Bachelor- und 18 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 (> 500 pro Jahr), von denen in 2023 aber nur 25 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 am 23. Juni 2023 stattfand. Der **Preis für die beste Masterarbeit ging im Jahr 2023** an zwei Masterstudierende. Zum einen an Herrn M. Sc. Max Deutschmann, Absolvent am EBI vbt, für seine Masterarbeit zum Thema „Simulation eines innovativen Verfahrens zur Verwendung von Ammoniak als Energieträger“, (**Bild 3**) sowie an Herrn M. Sc. Jonas Ullmann für seine Masterarbeit zum Thema „Aufbereitung von Grundwässern mit Aktivkohlefiltration am Beispiel der Wasserwerke Rauschen und Schlierbach“. Herr Ullmann erhielt für die Arbeit darüber hinaus den Studienpreis Wasser des DVGW (**Bild 4**).

## 1. Chemische Energieträger - Brennstofftechnologie, EBI ceb und Bereich Gastechologie der DVGW-Forschungsstelle

Thomas Kolb, Reinhard Rauch, Moritz Wolf, Siegfried Bajohr, Frank Graf

### 1.1 Lehre

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

Die Forschungsarbeiten des EBI ceb konzentrieren sich auf Energierohstoffe und chemische Energieträger, 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.

Im Rahmen der im Jahr 2022 am EBI ceb neu geschaffenen Tenure-Track-Professur für Katalysatormaterialien für die Energiewende, befasst sich Prof. Moritz Wolf mit Katalysatormaterialien und Prozessentwicklung. 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 Gastechologie 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 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 Gastechologie“, „Wirbelschichttechnik“, „Catalysts for the Energy Transition“ und „Chemical Hydrogen Storage“ werden von den Lehrenden des EBI ceb angeboten. Die Vorlesungen im Vertiefungsfach werden ergänzt durch Vorlesungen des Institutsteils Verbrennungstechnik, EBI vbt, und Vorlesungen anderer Institute des KIT.

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 ingenieurtechnischen 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 Profillfach „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“, worin den Studierenden im Bachelorstudium grundlegende Kenntnisse der Ethik und wichtige Stoffkreisläufe auf der Erde und ihre Beeinflussung durch die Gesellschaft vermittelt werden.

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

### 1.2 wichtige Ereignisse in 2023

#### **Nachfolge Prof. Kolb**

Die Professur „Verfahrenstechnik chemischer Energieträger und Rohstoffe“ (Nachfolge Prof. Kolb) wurde in 2023 ausgeschrieben. Am 26. und 27. Januar 2023 stellten sich sechs Bewerberinnen und Bewerber im Rahmen eines Kolloquiums an der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen vor. Der Ruf an den ausgewählten Kandidaten für die Nachfolge ist mittlerweile ergangen.

#### **Wanderseminar**

Vom 3. bis 5. April 2023 trafen sich Promovierende und Lehrende des EBI ceb beim traditionellen Wanderseminar im Naturfreundehaus Rahnenhof zur Diskussion der Promotions-themen, aber auch zum Wandern und für persönliche Gespräche.

#### **Präsentation des KIT auf der Hannover Messe im April 2023**

Auf der Hannover Messe präsentierte das KIT mit dem Energy Lab 2.0 Europas größte Forschungsinfrastruktur für erneuerbare Energien. Das interessierte internationale Publikum konnte sich an einem großen Messestand mit attraktiven Exponaten über innovative Technologien und die damit verbundenen KIT-Forschungsaktivitäten informieren. Schwerpunkt des Messeauftritts waren die unterschiedlichen PtX-Prozesse, die am EnergyLab des KIT im technisch relevanten Umfeld erforscht werden.

Forschende des EBI ceb und der DVGW-Forschungsstelle konnten in diesem Rahmen die katalytische Methanisierung sowie weitere Entwicklungen und Forschungsprojekte einer



**Bild 1.1:** Stefan Schneider (EBI ceb) erklärt Baden-Württembergs Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann die Vorteile der Dreiphasen-Methanisierung an Hand eines Blasensäulen-Exponats. Ruth Schlautmann (DVGW EBI) unterstützt in Fragen der Umsetzung für die Energiewende aus Sicht der DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT



**Bild 1.2:** Frau Prof. Sonia Rincon (Bildmitte) mit Gaswissenschaftlern und Studierenden der Universidad Nacional de Colombia

breiten Öffentlichkeit vorstellen. Abgerundet wurde der Messeauftritt durch einen Beitrag im KIT-Magazin lookKIT [<https://www.sts.kit.edu/downloads/lookkit-202301.pdf>].

Ein Höhepunkt am Messestand war der Besuch des baden-württembergischen Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann. Anhand von Exponaten und eines interaktiven Medientisches informierte er sich über den möglichen Beitrag der katalytischen Methanisierung zur Energiewende (**Bild 1.1**).

### **Internationale Zusammenarbeit**

In 2023 konnte EBI ceb Gastwissenschaftler und Studierende von der Universidad Nacional de Colombia willkommen heißen. Frau Professor Sonia Rincón Prat forschte im Juli am EBI ceb und untersuchte gemeinsam mit der Arbeitsgruppe „Thermo-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung“ das Systemantwortverhalten des differentiellen Festbettreaktors.

Am 16. und 17. Oktober besuchte Frau Professor Rincón dann mit einer Gruppe kolumbianischer Studierender im Rahmen einer vom DAAD unterstützten Reise das EBI ceb und das EnergyLab des KIT (**Bild 1.2**).

Von Mai 2023 bis März 2024 arbeitete die iranische Doktorandin Frau Nazanin Nik Bakht von der University of Sistan and Baluchestan, Iran, als Gastwissenschaftlerin am EBI ceb gemeinsam mit Herrn Philipp Graefe an der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS). Ziel des Aufenthalts war der Vergleich von einem Katalysator auf Basis von Eisen auf dem Trägermaterial  $\text{SiO}_2$  mit den von Herrn Graefe untersuchten FT-Katalysatoren auf Basis Eisen mit Trägermaterial Aluminiumoxid. Die Zusammenarbeit ergab interessante Einblicke in die Arbeitsweise der University of Sistan and Baluchestan und auch in die Herstellung von FT-Katalysatoren.

### **EBI ceb Wandertag und Sommerfest, Weihnachtsmarkt**

Der Betriebsausflug für das EBI ceb und die DVGW-Forschungsstelle wurde am 26. Juli 2023 veranstaltet. Am Morgen traf sich der größte Teil der Belegschaft zum gemeinsamen Wandern zunächst an der Straßenbahnhaltestelle in Leopoldshafen. Entlang des Rheins, Altrheins und der Alb ging es zu einem Imbiss am Kleinen Bodensee. Die Wanderung endete an der Haltestelle Neureut Kirchfeld, von wo aus die Rückfahrt mit der Straßenbahn zum EBI angetreten werden konnte. Dort war bereits alles für das anschließende Sommerfest vorbereitet.

Am 20. Dezember 2023 durfte wieder gefeiert werden. Diesmal wärmte nicht die Sonne von außen, sondern hausgemachter Eintopf und Glühwein von innen. Auf dem vor dem Institutsgebäude organisierten Weihnachtsmarkt stimmten alle in die Weihnachtslieder mit Trompetenbegleitung ein und genossen die festliche Atmosphäre.

### **Festkolloquium zu Ehren Prof. Reimerts 80. Geburtstag**

Am 6. Oktober 2023 kamen im Engler-Bunte-Institut zu Ehren des 80. Geburtstags von Herrn Prof. Rainer Reimert seine ehemaligen Doktoranden, Kollegen und Mitarbeiter des EBI und weiterer Institute des KIT, sowie ehemalige Kollegen aus seiner Zeit in der Industrie zu einem Festkolloquium zusammen.

Prof. Reimert war seit 1994 Leiter des heutigen Instituts teils „Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie – EBI ceb“, in dem damals noch unter dem Thema „Chemie und Technik von Gas, Erdöl und Kohle – EBI GEK“ geforscht und gelehrt wurde. Im Jahr 2010 übergab er seine Ämter an Herrn Prof. Thomas Kolb.

Das Fachkolloquium unter dem Titel „Chemieingenieurinnen und -ingenieure in der Prozess- und Anlagentechnik“

**Bild 1.3:** Prof. Dr.-Ing. Rainer Reimert bei seinem Vortrag am 06.10.2023



wurde gestaltet von ehemaligen Doktoranden von Linde Engineering, BASF, METSO und der DVGW-Forschungsstelle am EBI, die nach der Begrüßung durch Prof. Kolb und unter der launigen Moderation durch Dr. Bajohr mit ihren Vorträgen das breite Spektrum der Chemieverfahrenstechnik beleuchteten und demonstrierten wie brisant, hochaktuell und unabdinglich Forschung und Lehre auf diesem Gebiet sind. Auch zeigten sie auf, wie stark sie auf Ihrem Karriereweg neben der wissenschaftlichen Lehre auch von dem individuellen Statement Prof. Reimerts geprägt waren und sind.

Prof. Reimert beschloss das Kolloquium mit seinem Vortrag, in dem er kurz seinen Weg aus der Industrie, damals der Fa. Lurgi, hin zu Forschung und Lehre an der Universität Karlsruhe (TH) beschrieb. Sein wissenschaftliches und persönliches Resümee veranschaulichte seine hohe Motivation und Begeisterung zum Forscher und akademischen Lehren.

Dies wurde im Anschluss an die Vorträge beim festlichen Buffet von all seinen Gästen aufs deutlichste und durchaus auch sehr emotional reflektiert. Bei schönem Herbstwetter ging die Veranstaltung in eine ausdauernde abendliche Feier über. Für alle Beteiligten ein interessanter und unvergesslicher Tag (Bild 1.3)

**Herbstveranstaltung der DGMK Bezirksgruppe Oberrhein – Vorträge zum Thema: „Wasserstoff“**



Im Rahmen der Herbstveranstaltung der DGMK Bezirksgruppe Oberrhein fand am 16. November 2023 auf Einladung der DVGW-Forschungsstelle am EBI eine Vortragsveranstaltung zum Thema „Wasserstoff“ im Engler-Bunte-Institut statt. Zu den Vortragenden zählten neben den internen Mitarbeitern auch Fachleute von MiRO, BASF und Thyssenkrupp.

Die Vorträge reichten von „H<sub>2</sub> in der Raffinerie“, „H<sub>2</sub> in der BASF“, „Power to Ammonia – Ein zentrales Element einer kohlenstofffreien Zukunft“ bis zu „Vergleich von Importoptionen für Wasserstoff und Derivate“. Mehr als 60 Fachleute diskutierten die Vorträge und trafen sich danach zum weiteren Austausch in gemütlicher Atmosphäre bis in den Abend hinein.

**Heraeus-Seminar**

TT-Prof. Dr. Moritz Wolf war Mitorganisator des Seminars „Sustainable Aviation Fuels – Design, Production and Climate Impact“ der Wilhelm-und-Else-Heraeus-Stiftung, das vom 24. bis 27. Mai im Physikzentrum Bad Honnef stattfand. Internationale Experten diskutierten die gesamte Prozesskette vom Rohstoff bis zur Produktion und Anwendung nachhaltiger Flugtreibstoffe. EBI-ceb Alumnus Prof. Dr.-Ing. Michael Claeys (Universität Kapstadt) referierte als eingeladener Referent über die Möglichkeiten und Herausforderungen der Fischer-Tropsch-Synthese in der Produktion von nachhaltigem Kerosin.

**1.3 Forschungsprojekte im Jahr 2023**

Auch im Jahr 2023 wurden am EBI ceb und im Bereich Gas-technologie der DVGW-Forschungsstelle wichtige Forschungsprojekte aus dem Umfeld der Energiewende und der Gaswirtschaft durchgeführt. Besonders hervorzuheben sind dabei folgende Projekte:

1. **H<sub>2</sub>-Leitprojekt TransHyDE (BMBF):** In dem aus neun Verbänden 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 H<sub>2</sub> TransHyDE, in dem es um den leitungsgebundenen H<sub>2</sub>-Transport geht, wurden 2023 Laboruntersuchungen zur adsorptiven Entfernung von Spurenstoffen aus Wasserstoff durchgeführt und die H<sub>2</sub>-Spurenanalytik weiter ausgebaut. Im Verbundprojekt TransHyDE – Sys“ wurden weiterführende Untersuchungen zum Import von H<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>-Derivaten durchgeführt und das Thema THG-Wirkung von H<sub>2</sub> adressiert. Außerdem wurden die inhaltlichen Arbeiten im Verbund LNG2Hydrogen begonnen, bei dem die Umrüstung von LNG-Terminals auf Flüssigwasserstoff oder H<sub>2</sub>-Derivate im Fokus steht.
2. **H<sub>2</sub>-Leitprojekt H<sub>2</sub>Mare (BMBF):** In vier Verbundprojekten mit 32 Partnern und einem Fördervolumen von ca. 105 Mio. € untersuchen EBI ceb und DVGW gt gemeinsam die Offshore-Erzeugung von Liquefied Natural Gas (LNG) auf Basis der am Institut entwickelten Waben-Methanisierung. Neben Grundlagenuntersuchungen am Institut und theoretischen Betrachtungen und vergleichenden Bewertungen mit anderen Prozessketten wurde im Jahr 2023 die Errichtung der LNG-Prozesskette im Demomaßstab von der Wasserelektrolyse über die Methanisierung und Gasaufbereitung bis hin zur Verflüssigung am KIT Energy Lab 2.0 weiter vorangetrieben. Die Planungsarbeiten zur Anpassung und Integration der verschiedenen Systemkomponenten dieser Prozesskette in die Energy Lab 2.0 Infrastruktur wurden abgeschlossen und mit den Umbauarbeiten begonnen.
3. **ENSURE II +III (BMBF):** Das Kopernikus-Projekt ENSURE II zu neuen Netzstrukturen wurde 2023 abgeschlossen. DVGW gt hat zusammen mit externen Projektpartnern ein Konzept zur sektorengkoppelten Verschaltung von Energieanlagen und -infrastrukturen entwickelt. Außerdem

wurde die dritte Projektphase begonnen, in der DVGW gt neben der Fortführung der Modellierarbeiten zur Sektorenkopplung auch für das Thema Wasserstoff zuständig ist.

4. **InnoSyn (BMBF):** Im Projekt „InnoSyn (Innovative Synthesen flüssiger Energieträger in lastflexiblen Blasensäulen)“ wurden die Arbeiten 2023 weitergeführt. In der Gruppe von Prof. Rauch liefen die experimentellen Versuche zur direkten CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch Synthese erfolgreich. In der Gruppe von Dr. Bajohr wurde die Transfer-Methanisierung weiter experimentell untersucht, wobei der Schwerpunkt auf Hydrierung und Dehydrierung von der Flüssigphase inkl. Nebenreaktionen lag. Bei DVGW gt liefen neben den experimentellen Arbeiten zur Untersuchung der Fluidynamik die Erstellung der Massen- und Energiebilanzen mit anschließender technoökonomischer Beurteilung der beiden Prozessrouten.
5. **REF4FU (BMDV):** Im vom IKFT koordinierte Vorhaben „Erneuerbare Kraftstoffe aus Grünen Raffinerien der Zukunft“ starteten die Arbeiten in 2023. Um die Analytik zu erweitern, wurde eine GCxGC-Kopplung angeschafft, welche 2024 in Betrieb gehen wird. Damit können in Zukunft auch sehr komplexe Kohlenwasserstoffmischungen analysiert werden. Die Versuchsanlage zum Hydroprocessing wurde angepasst und betriebsbereit gemacht, damit die experimentellen Arbeiten in 2024 starten können.
6. Das Projekt **CARE-O-SENE** (<https://care-o-sene.com/>) wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und verbindet sieben deutsche und süd-afrikanische Projektpartner. Ziel ist die wirtschaftlichere Produktion von umweltfreundlichem Kerosin als Kraftstoffalternative. Der Beitrag der Arbeitsgruppe von Prof. Moritz Wolf ist die Entwicklung und Herstellung von Modellkatalysatoren, um mittels fortschrittlicher Charakterisierungstechniken Einblicke in strukturelle Abhängigkeiten und Funktionsprinzipien zu gewinnen.
7. Das assoziierte Projekt „**Inductive heating of catalysts and novel reactor designs**“ untersucht im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 1441 (<https://www.trackact.kit.edu/>) „Tracking the Active Site in Heterogeneous Catalysis for Emission Control“ die Anwendung elektromagnetischer induktiver Beheizung als aufstrebende Heiztechnologie in katalytischen Anwendungen. In diesem Projekt wird die Anwendung der induktiven Beheizung von Katalysatoren für die Emissionskontrolle mit mehreren skalenübergreifenden Ansätzen erforscht, welche von Laborreaktoren bis in den Nanometerbereich reichen.

#### 1.4 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 2023

##### Promotionen

Folgende Dissertationen wurden in 2023 erfolgreich abgeschlossen:

- „Hydrodynamik in Blasensäulen – Etablierung von integralen und lokalen Messverfahren und einem wohl definierten Experiment“, Friedemann Mörs, Referent Prof. Kolb, <https://doi.org/10.5445/IR/1000165191>
- „Hydroprocessing von synthetischen Wachsen zur Schmiermittelproduktion“, Philipp Neuner, Referent Prof. Rauch, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000161117>
- „Scale-up and design of gas-assisted atomizers“, Simon Wachter, Referent Prof. Kolb, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000159585>

##### Masterarbeiten

Ihr Masterstudium erfolgreich abgeschlossen haben:

- Kassian Armbruster, „Beschreibung der Hydrierreaktion der Flüssigphase in der Dreiphasen-Methanisierung“, Prof. Kolb
- German Eduardo Delgado Carreno, „Start-up and validation of a profile reactor for reaction measurements of methanol and methane synthesis“, Prof. Kolb
- Alexander Diener, „Untersuchungen zur Vergasung biogener Festbrennstoffe im Gemisch aus H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> bei erhöhtem Druck“, Prof. Kolb
- Fabian Eckert, „Charakterisierung von Sorbenzien und Inbetriebnahme eines Kaltmodells für die sorptionsgestützte Fischer-Tropsch-Synthese im dreiphasigen System“, Prof. Rauch
- Vincenta Franßen, „Kinetische Studie und Reaktormodellierung der dreiphasigen CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch-Synthese“, Prof. Rauch
- Florentin Glockner, „Modellierung von technischen Wabenkatalysatoren für die katalytische Methanisierung“, Prof. Kolb
- Valentin Honold, „Grundlegende Untersuchung zur Reaktionskinetik der dreiphasigen CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch-Synthese“, Prof. Rauch
- Anna Koltsova, „Stationäre Simulation einer CO<sub>2</sub>-Gaswäsche mittels Ionischer Flüssigkeiten in Packungskolonnen“, Prof. Kolb

##### Bachelorarbeiten

Ihr Bachelorstudium erfolgreich abgeschlossen haben:

- Ole Kemkes, „Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der Flüssigkeitsspaltbreite dreiflutiger Zerstäuberdüsen“, Prof. Kolb
- Jannis Kümmerle, „Investigation of the activation method of a commercial catalyst for methanol synthesis“, Prof. Kolb
- Robin Lamparter, „Modellgeschützte Vorhersage der Zirkulationsraten in einem neuartigen Reaktorkonzept für die sorptionsgestützte Fischer-Tropsch-Synthese“, Prof. Rauch
- Paul Rosenberger, „Einfluss der Flüssigphase auf die Aktivierung des Nickelkatalysators in der Dreiphasen-Methanisierung“, Prof. Kolb
- Jonathan Schmitz, „Modellierung der Gasphasenreaktionen in einem Flugstromvergaser mit einem 2-Phasen-Freistrahlanstrich“, Prof. Kolb



Bild: Peter Leuten, DVV Media

**Bild 1.4:** Übergabe der Urkunde: (von links) Dr. Gesa Netzeband (DGMK-Geschäftsführerin), TT-Prof. Dr. Moritz Wolf (Carl-Zerbe-Preisträger), Prof. Dr. Dieter Vogt (DGMK-Fachbereichsleitung Petrochemie)



© Moritz Schäfer

**Bild 1.5:** Prof. Roland Dittmeyer (KIT, links), Dr. Udo Götschel (Hager-Stiftung, rechts) mit dem Preisträger

### Preise / Auszeichnungen

#### Carl-Zerbe-Preis für TT-Prof. Dr. Moritz Wolf

TT-Prof. Dr. Moritz Wolf hat den renommierten Carl-Zerbe Preis der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe e. V. (DGMK) erhalten. Der Preis würdigt hervorragende wissenschaftliche Arbeiten jüngerer Wissenschaftler in den fachlichen Gebieten der Verarbeitung und Anwendung von Kohlenstoffträgern, wie deren Konversion. Die Verleihung des mit 5.000 Euro dotierten Preises fand im Rahmen der DGMK/ÖGEW/SCI-Conference „C1 Building Blocks for Future Chemistry“ am 12. Oktober 2023 in Dresden statt (**Bild 1.4**).

#### Peter-und-Luise-Hager-Preis für Dr.-Ing. Florian Nestler

Für seine mit Auszeichnung abgeschlossene Dissertation zum Thema „Dynamic Operation of Power-to-X Processes Demonstrated by Methanol Synthesis“ erhielt Herr Nestler den Peter-und-Luise-Hager-Preis im Jahr 2023. Die Fachjury würdigte damit seine „wegweisenden experimentellen und theoretischen Arbeiten zur quantitativen Beschreibung des dynamischen Betriebs von Power-to-Methanol-Anlagen im Kontext zeitlich variabler Energiebereitstellung aus Erneuerbaren Energien“. Florian Nestler promovierte am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE in enger Kooperation mit dem Engler-Bunte-Institut unter der wissenschaftlichen Betreuung von Prof. Thomas Kolb.

Die Peter-und-Luise-Hager-Stiftung honoriert mit ihrem Preis herausragende wissenschaftliche Leistungen im Bereich Energie- und Umwelttechnik. Der Preis ist mit 3.000 € dotiert und wurde am 30. Juni 2023 im Rahmen der Feier der Absolvierenden und Absolventen der Masterstudiengänge 2022/23 des Karlsruhe Instituts für Technologie (KIT) an Herrn Nestler überreicht (**Bild 1.5**).

#### Posterpreis WE-Heraeus-Seminar für Cherie Hsu

Cherie Hsu gewann einen Posterpreis (**Bild 1.6**) auf dem WE-Heraeus-Seminar „Sustainable Aviation Fuels – Design, Production and Climate Impact“ (siehe Heraeus-Seminar). Sie präsentierte ein Poster zu ihrer Arbeit im CARE-O-SENE-Projekt (<https://care-o-sene.com/>) mit dem Titel „Cobalt oxide model systems with mixed metals (Mn, Al, Ti) for optimising the sustainable production of aviation fuel by Fischer-Tropsch synthesis“. In ihrer Forschung synthetisiert sie Nanopartikel und Modellkatalysatoren, um die jeweilige Rolle der individuellen Komponenten eines kommerziellen kobaltbasierten Fischer-Tropsch-Katalysators der nächsten Generation grundlegend zu verstehen.

### 1.5 Laufende wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 2023

#### 1.5.1 Arbeitsgruppe „Katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung“

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

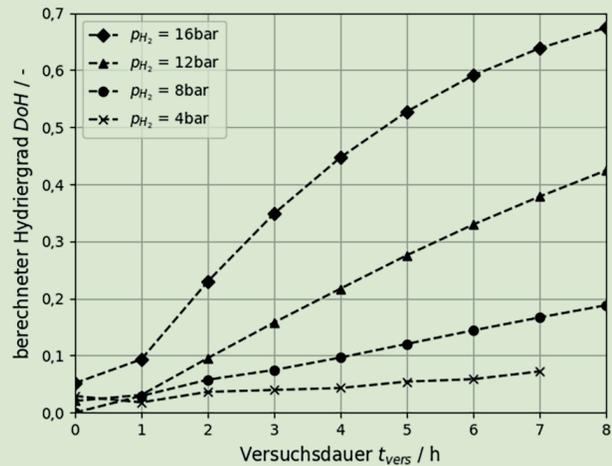
#### Methanisierung im Dreiphasen-Reaktor

Am KIT Energy Lab 2.0 betreibt EBI ceb eine 100 kW Demonstrationsanlage zur Dreiphasen-Methanisierung (3PM), über die im gwf Gas + Energie, 5/12, bereits berichtete wurde. Begleitet werden die Versuchskampagnen im realen Einsatzfeld durch wissenschaftliche Forschungsarbeiten im Labormaßstab, welche dem tieferen Verständnis der bei der Dreiphasen-Methanisierung ablaufenden verfahrenstechnischen Vorgänge dienen. In 2023 lag der Schwerpunkt der Arbeiten hierzu auf der Aufklärung und Beschreibung der bei der Dreiphasen-Methanisierung ablaufenden Nebenreaktio-



Bild: Martina Albert

**Bild 1.6:** Übergabe des Preises an Cherie Hsu: (von links) Dr. Markus Köhler (DLR), Dr. Victor Burger (Sasol Germany), Dr. Christoph Arndt (DLR), Cherie Hsu (KIT, IKFT)



**Bild 1.7:** Verlauf des Hydriergrads DoH der Flüssigphase Dibenzyltoluol in Abhängigkeit von der Versuchsdauer  $t_{\text{vers}}$  für verschiedene Wasserstoffpartialdrücke  $p_{\text{H}_2}$ . Reaktortemperatur  $T_{\text{R}} = 300 \text{ °C}$  [1]

nen. Es wurden vor allem experimentelle Untersuchungen zur Hydrierung des als Flüssigphase in der 3PM verwendeten Dibenzyltoluols (DBT:  $\text{C}_{21}\text{H}_{20}$ ) und zu Zersetzungsreaktionen unter den Bedingungen der 3PM durchgeführt. **Bild 1.7** zeigt exemplarische Ergebnisse hierzu und belegt an Hand des aufgetragenen DBT-Hydriergrads, dass an dem für die Methanisierung genutzten Nickelkatalysator unter den für die Methanisierung typischen Reaktionsbedingungen DBT bis zum chemischen Gleichgewicht hydriert werden kann. Die Hydrieraktivität zeigt dabei die erwartete starke Druckabhängigkeit, auch wurde bei Temperaturen ab  $280 \text{ °C}$  eine Katalysatordesaktivierung festgestellt, deren Ursache aber bisher noch nicht vollständig erklärt werden kann, da weitere Versuche zeigen, dass bei gleichzeitig ablaufender Methanisierung (initiiert durch  $\text{CO}_2$ -Zugabe) diese bevorzugt abläuft und dadurch Nebenreaktionen wie Hydrierung und Desaktivierung zurückgedrängt werden.

Als Konsequenz aus diesen Ergebnissen müssen zur vollständigen Beschreibung der Dreiphasen-Methanisierung auch die DBT-Hydrierung und -Dehydrierung berücksichtigt werden, da im Reaktionsverlauf, vor allem abhängig von Temperatur und  $\text{H}_2$ -Partialdrücken, die Zusammensetzung zwischen unhydriertem H0-DBT (DoH = 0) und H18-DBT (DoH = 1) variiert und wesentliche Stoffparameter wie Dampfdruck oder Gaslöslichkeiten hiervon beeinflusst werden.

In aktuell laufenden Untersuchungen werden der Einfluss des Hydriergrads auf den  $\text{CO}_2$ -Umsatz in der Methanisierung und weitere Fragestellungen aus dem durch Methanisierung, Hydrierung und Desaktivierung aufgespannten Reaktionsnetzwerk bearbeitet.

Diese Untersuchungen sind Teil des BMBF-geförderten Projektes InnoSyn, in welchem innovative Syntheseprozesse zur Erzeugung chemischer Energieträger aus grünem Wasser-

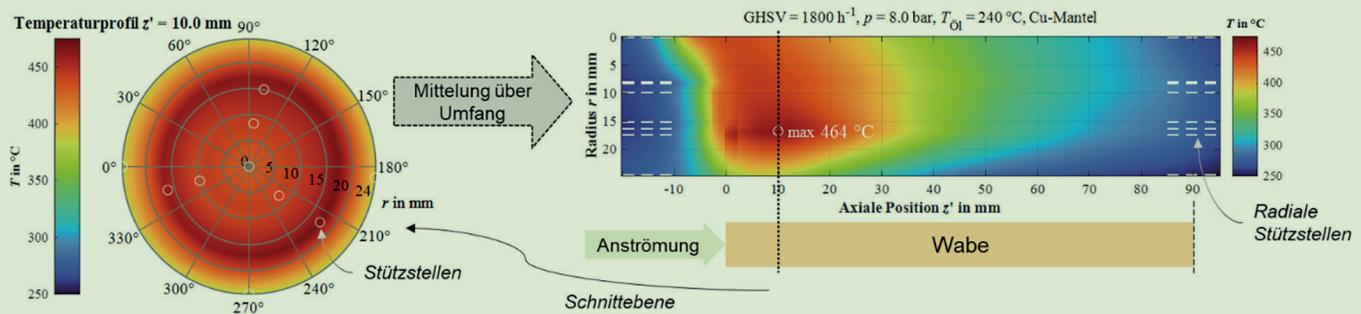
stoff untersucht werden. Am Projektende von „InnoSyn“ soll ein Verfahrenskonzept zur Transfer-Methanisierung stehen, für welches aktuell eine Versuchsapparatur am EBI ceb in Betrieb geht. Bei der Transfer-Methanisierung wird bewusst der zuvor beschriebene Effekt der bei der Dreiphasen-Methanisierung parallel ablaufenden Hydrierung und Dehydrierung der Flüssigphase ausgenutzt, um dadurch temporären  $\text{H}_2$ -Überschuss zwischenspeichern bzw. zusätzlichen  $\text{H}_2$  über die Flüssigphase in die Methanisierung einbringen zu können.

#### Literatur

- [1] K. Armbruster. Beschreibung der Hydrierreaktion von Dibenzyltoluol bei der Dreiphasen-Methanisierung. Masterarbeit (2023).

#### Methanisierung im Waben-Reaktor

Die Nutzung und Speicherung von offshore erzeugtem Wasserstoff stellt den Schwerpunkt im BMBF-geförderten Projekt „H2Mare“ dar. Zur Steigerung der Energiedichte und Erhöhung der Nutzbarkeit werden im Arbeitspaket „PtX-Wind“ Prozessketten zu Wasserstoff-Derivaten wie zum Beispiel Methanol, Ammoniak, Fischer-Tropsch-Produkten und Methan betrachtet. Verflüssigt und als regenerativ erzeugtes LNG stellt Methan eine interessante Möglichkeit für Speicherung und Transport großer Energiemengen über lange Strecken dar. Als Beitrag des EBI ceb zu diesem Konzept wird im Labor die Weiterentwicklung der Waben-Methanisierung vorangetrieben, die bisher in Form der 1 MW „WindGas“ Anlage in Falkenhagen ihren Höhepunkt erreichte (<https://www.sto-reandgo.info/index.html>) und ihre großtechnische Tauglichkeit unter Beweis stellte. Die Ziele der H2Mare begleitenden Arbeiten am EBI ceb sind vor allem die Weiterentwicklung hin



**Bild 1.8:** Temperaturprofile innerhalb der Wabe während der Methanisierung; links: Querschnitt bei  $r = 10$  mm, rechts radial interpolierter Längsschnitt mit Schnittebene bei  $z = 10$  mm

zu einem einfacheren Reaktorkonzept geeignet für Methanisierungsanlagen im Bereich von 50 MW Methanproduktion oder mehr, die Optimierung der Katalysatorwaben hinsichtlich Geometrie, Material und Beschichtung zur weiteren Effizienzsteigerung und die Beschreibung der maßgeblichen Wärme- und Stofftransportvorgänge für eine zuverlässige Modellierung und Auslegung technisch relevanter Reaktorgrößen.

Zur experimentellen Untersuchung des Temperaturprofils innerhalb der Waben wurde eine hochauflösende faseroptische Temperaturmessung in eine Versuchsapparatur am EBI ceb integriert, mit deren Hilfe sehr präzise dreidimensionale Temperaturverteilungen in Wabenkörpern unter Reaktionsbedingungen gemessen werden können. Eines der wichtigsten Ergebnisse der laufenden Untersuchungen ist, dass erstmals detaillierte und reproduzierbare Messergebnisse zu Temperatur-Inhomogenitäten innerhalb der Wabe vorliegen, welche vorher bekannt, aber nicht quantifizierbar waren. Diese Inhomogenitäten treten auf Grund von Fertigungstoleranzen seitens der Waben und der Reaktionsrohre auf und können zu Temperaturdifferenzen von mehr als 100 K zwischen eigentlich isothermen Stellen am Umfang des Reaktorrohrs oder innerhalb der Wabe führen. Modellrechnungen und Messungen in perfekten Laboraufbauten können solche Effekte nicht abbilden, für mathematische Beschreibungen des Gesamtsystems und die darauf aufbauende technische Umsetzung sind diese jedoch von entscheidender Bedeutung.

**Bild 1.8** zeigt ein typisches hochaufgelöstes Temperaturprofil, welches im laufenden Methanisierungsbetrieb gemessen wurde. Auf der linken Seite des Bildes ist der Querschnitt bei der axialen Position  $z = 10$  mm dargestellt (entspricht 10 mm nach Eintritt der Strömung in die Wabe). Die weißen Kreise entsprechen den Stützstellen, an welchen die Temperaturen mittels Messlanzen aufgenommen wurden. Das gesamte Profil, welches anhand der Stützstellen durch Interpolation erstellt wurde, ist auf der rechten Seite des Bildes dargestellt. Neben der Markierung der heißesten Position ist zu erkennen, dass es im gesamten Einlaufbereich zu einer

starken Wärmeentwicklung kommt. Im weiteren Verlauf der Wabe erfolgt die Abkühlung auf Grund der nachlassenden Wärmefreisetzung durch Reaktion, bis fast die Temperatur der äußeren Thermostatisierung von 240 °C erreicht wird.

Anhand dieses Bildes lassen sich die Stärken der metallischen Waben mit ihren hohen Wärmeleitfähigkeiten sehr gut erkennen: Im Eintrittsbereich steigt die Gastemperatur auf Grund der exothermen Reaktion schnell an. Auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit der metallischen Waben kann dieser Anstieg jedoch begrenzt und kontrolliert werden, ohne auf den Vorteil der hohen Reaktionsgeschwindigkeit verzichten zu müssen. Im hinteren Bereich sinkt die Temperatur dann auf einen für den angestrebten hohen Gleichgewichtsumsatz vorteilhaften Wert ab und Umsätze nahe der Grenze des chemischen Gleichgewichts werden erzielt.

In 2024 werden die Laborergebnisse zur weiteren Verbesserung der bereits vorhandenen Modelle genutzt und die Erkenntnisse durch Übertragung in den Technikumsmaßstab am KIT Energy Lab 2.0 verifiziert. Dort wird aktuell in Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen vom Bereich Gastechologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI die vorhandene Containeranlage zur Waben-Methanisierung den aktuellen Erkenntnissen aus dem Labor angepasst und in die Gesamtprozesskette aus Wasser-Elektrolyse, Methanisierung, Gasaufbereitung und Verflüssigung zu LNG integriert.

### **Methanolsynthese**

Die laufenden wissenschaftlichen Arbeiten zur Verfahrenstechnik und hierbei speziell zur Reaktionskinetik der  $\text{CO}_2$ -basierten Methanolsynthese beschäftigten sich in 2023 vor allem mit der Ermittlung verlässlicher reaktionskinetischer Daten zu diesem Forschungsgebiet. Untersuchungen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass selbst in renommierten Veröffentlichungen wesentliche Einflussgrößen nicht erkannt oder fälschlicherweise nicht berücksichtigt wurden, da deren Einfluss auf die Messergebnisse und die daraus abgeleitete Reaktionskinetik unterschätzt wurde. Beispiele hierfür sind u. a. das Schüttverhalten des eingesetzten Katalysators und die daraus resultierende Ungleichverteilung der Strömung durch

das poröse Katalysatormedium oder die Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit des Katalysator-/Gas-Gemisches. Durch experimentelle Versuche und modellbasierte Ansätze konnten im Jahr 2023 eine Vielzahl dieser Aspekte untersucht und quantifiziert werden, sodass die Grundlage und Randbedingungen für verlässliche reaktionskinetische Messungen geschaffen wurden.

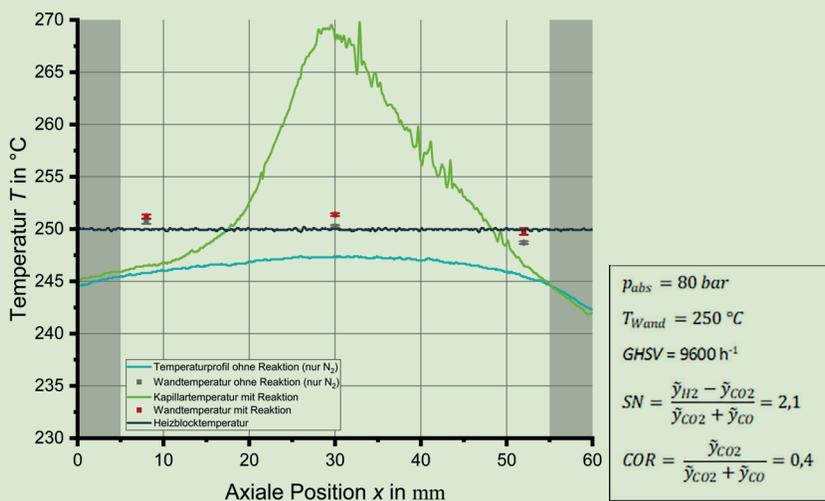
Es konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass die Partikelgrößenverteilung ein nicht zu vernachlässigender Parameter beim Aufbau einer möglichst homogenen Schüttung innerhalb eines Festbetts ist. Die einzelnen Partikel dürfen einerseits nicht zu klein und die Partikelgrößenverteilung andererseits nicht zu breit sein, da dies sonst bei der Schüttung des Betts sowie der anschließenden Reduktion des Katalysators (mit Volumenkontraktion verbunden) zur Hohlräumbildung führen kann. Durch diese Hohlräume kommt es während der Reaktion zu „Kurzschlussströmungen“, durch die sich weder ein homogenes Strömungsprofil in radiale Richtung noch eine konstante Strömungsgeschwindigkeit in axiale Richtung ausprägen kann. Somit können die direkt damit korrelierenden Temperatur- und Konzentrationsprofile lokal stark schwanken und die üblicherweise bei der reaktionskinetischen Auswertung getroffene Annahme eines idealen Pfropfstromreaktors ist nicht mehr gegeben.

**Bild 1.9** zeigt ein Ergebnis mit dem am EBI ceb speziell für die Ermittlung reaktionskinetischer Daten stark exothermer Reaktionen aufgebauten Profilreaktor. Dargestellt sind die axialen Temperaturverläufe auf der Symmetrieachse des Reaktorbetts mit Synthesegas (= mit Reaktion) und zum Vergleich mit reinem Stickstoff (= ohne Reaktion). Die jeweils drei dazu gemessenen Temperaturen der Außenwand zeigen nur eine geringe Temperaturerhöhung durch die Wärmeentwicklung bei der Methanolsynthese. Die grüne Kurve jedoch zeigt ein deutlich ausgeprägtes nichtisothermes Profil mit einem Temperaturanstieg um ca. 25 K selbst in diesem auf Isothermie hin optimierten Versuchsaufbau! Eine „klassische“ reakti-

onskinetische Auswertung solcher Messergebnisse ist naturbedingt fehlerbehaftet und liefert spätestens bei der Nutzung zur Reaktorauslegung und Übertragung auf die technische Anwendung falsche Ergebnisse. Der Effekt des ausgeprägten Temperaturprofils wird in der Literatur oft durch starke Verdünnung der Eduktgase mit Inertgas und/oder des Katalysators mit Inertmaterial kompensiert. Die Übertragbarkeit der damit erzielten Ergebnisse auf die Realität ist aber nicht unbedingt gewährleistet. Am EBI ceb wurden zunächst der Einfluss einer geringeren Wandtemperatur und damit verbundener geringerer Gesamttemperatur und die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Schüttung zur verbesserten Wärmeabfuhr untersucht und erste Messungen zeigen deutliche Effekte. Der genaue Zusammenhang zwischen maximal einstellbarer Temperatur bei festgelegter Wärmeleitfähigkeit des Bettmaterials wird weiterhin untersucht und bildet die Grundlage zur Festlegung des Messbereichs der Reaktionskinetik der Methanolsynthese im EBI ceb Profilreaktor.

**Methanpyrolyse**

Neben der Wasserelektrolyse können auch andere Verfahren wie die z. B. die Methanpyrolyse dazu verwendet werden, um den zukünftigen H<sub>2</sub>-Bedarf CO<sub>2</sub>-neutrale bzw. CO<sub>2</sub>-arm zu decken. Durch den Eintrag chemischer Energie in Form von Methan kann bei gleichem regenerativen Stromangebot mit der Methanpyrolyse eine größere Menge Wasserstoff produziert werden als bei der reinen Wasserelektrolyse allein. Selbst bei der Verwendung fossilen Methans aus Erdgas wird bei der Wasserstoffherzeugung kein CO<sub>2</sub> freigesetzt. Natürlich müssen in der Realität auch Vorkettenemissionen berücksichtigt werden, welche beispielsweise bei der Erdgasförderung, dem Transport oder bei der Elektrizitätserzeugung anfallen. Andererseits kann die Wasserstoffherzeugung durch Methanpyrolyse sogar zu negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen führen, wenn der notwendige Strom regenerativ und das Methan z. B. aus Biomasse über Fermentation erzeugt wurde.



**Bild 1.9:** Temperaturprofile und Wandtemperaturen mit und ohne Reaktion im Profilreaktor

Für die Beschreibung, Bewertung und Auslegung technischer Pyrolysereaktoren oder zum Vergleich unterschiedlicher Verfahrenskonzepte miteinander sind hinreichend genaue reaktionskinetische Modelle nötig, welches es bisher so noch nicht gibt. Zwar sind in der Literatur viele Ansätze zur Beschreibung der „homogenen Methanpyrolyse“ veröffentlicht, die jedoch alle der näheren Betrachtung nicht standhalten können.

Das folgende Bild 1.10 zeigt sehr drastisch, dass die mit den zitierten Modellen berechneten Methanumsätze für eine angenommene Verweilzeit von fünf Sekunden extrem widersprüchliche Ergebnisse liefern, obwohl alle Autoren für sich in Anspruch nehmen, ein ideales System ohne (katalytische) Wandeffekte und sonstige Störgrößen betrachtet zu haben! Neben der eigentlichen Reaktion in der Gasphase kommt es zur Reaktion an den Reaktorwänden und damit zu sich positiv oder negativ auf den Methanumsatz auswirkenden Wandeffekten, die vor allem vom Reaktor(wand)material und dem im Reaktor vorliegenden Oberfläche zu Volumenverhältnis abhängen. Weiterhin muss beachtet werden, dass eigentlich alle Untersuchungen mit Methan in unterschiedlichen Reinheitsgraden durchgeführt wurden – einerseits nicht mit realem Erdgas und andererseits auch nicht mit hochreinem Methan. Die sich selbst aus Spurenkomponenten ergebenden zusätzlichen Reaktionspfade finden daher meist keinerlei Berücksichtigung in der Kommunikation der Ergebnisse. Um nun die möglichst homogene Methanpyrolyse experimentell untersuchen zu können und daraus verlässliche reaktionskinetische Daten zu gewinnen, wird idealerweise ein „wandloser“ Reaktor benötigt. Um sich diesem fiktiven experimentellen Aufbau anzunähern, wurde in 2023 am EBI ceb eine Technikumsapparatur aufgebaut, die eine stufenweise Variation des Verhältnisses aus Reaktoroberfläche und -volumen erlaubt und in den nächsten Wochen in Betrieb genommen wird. Weiterhin ist vorgesehen, dass speziell der Einfluss der Eduktgas-Zusammensetzung auf die Reaktionsgeschwindigkeit

quantifiziert wird, um daraus Aussagen zu möglichen positiven oder negativen Effekten der typischen Begleitkomponenten in Erdgas auf den Methanumsatz beschreiben zu können.

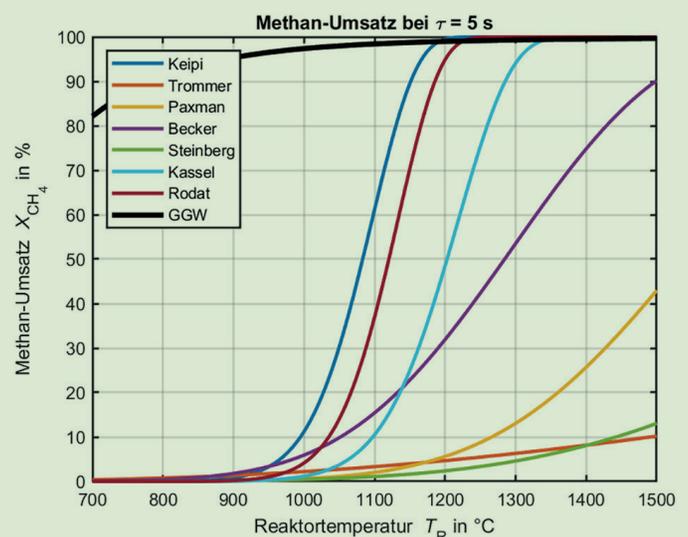
### Literatur

- [1] Trommer, D.; Hirsch, D.; und Steinfeld, A.: Kinetic investigation of the thermal decomposition of CH<sub>4</sub> by direct irradiation of a vortex-flow laden with carbon particles; *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 29, Nr. 6, S. 627–633, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.ijhydene.2003.07.001.
- [2] Keipi, T.; Li, T.; Løvås, T.; Tolvanen, H. Konttinen, J.: Methane thermal decomposition in regenerative heat exchanger reactor: Experimental and modeling study; *Energy*, Bd. 135, S. 823–832, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.176.
- [3] Paxman, D.; Trottier, S.; Flynn, M.R.; Kostiuk, L.; Secanell, M.: Experimental and numerical analysis of a methane thermal decomposition reactor; *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 42, Nr. 40, S. 25166–25184, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.134.
- [4] Becker, T.; Richter, M.; Agar, D.W.: Methane pyrolysis: Kinetic studies and mechanical removal of carbon deposits in reactors of different materials; *Int. J. Hydrog. Energy*, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.069.
- [5] Steinberg, M.: Production of hydrogen and methanol from natural gas with reduced CO<sub>2</sub> emission; *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 23, Nr. 6, S. 419–425, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0360-3199(97)00092-X.
- [6] Kassel, L.S.: The Thermal Decomposition of Methane, Jan. 1932, [Online]. Verfügbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja01349a019>
- [7] Rodat, S.; Abanades, S.; Coulié, J.; Flamant, G.: Kinetic modelling of methane decomposition in a tubular solar reactor; *Chem. Eng. J.*, Bd. 146, Nr. 1, S. 120–127, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.cej.2008.09.008.

### Ammoniak-Cracken

Für das Jahr 2050 rechnet die Bundesregierung mit einem stark steigenden Bedarf an regenerativ in Ländern des globalen Südens erzeugtem Wasserstoff zur Deckung des Bedarfs im Rahmen der Energiewende. Aus dieser Anforderung ergibt sich die Notwendigkeit für technisch schnell umsetzbare

**Bild 1.10:** Temperaturabhängigkeit des Methan-Umsatzes in der Gasphase bei p = 1 bar als Funktion der Temperatur im chemischen Gleichgewicht (GGW) und berechnet mit reaktionskinetischen Ansätzen aus [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]



Technologien zum H<sub>2</sub>-Transport, welcher in 2023 u. a. in der DVGW-Studie „Transportoptionen von Wasserstoff“ (<https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202224-h2-import-abschlussfolien-akt20230626.pdf>) der Kolleginnen und Kollegen vom Bereich Gastechologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI näher beleuchtet wurden.

Aufgrund seiner hohen Energiedichte und der etablierten globalen Infrastruktur für Transport und Speicherung wird Ammoniak als wasserstoffspeicherndes Molekül als eine attraktive Möglichkeit zum effizienten Transport großer Wasserstoffmengen über große Distanzen gesehen. Die für die Umwandlung des Ammoniaks zurück zu Wasserstoff und Stickstoff am Bestimmungsort notwendige Verfahrenstechnik ist jedoch noch nicht so weit entwickelt, dass hierfür bewährte Anlagenkonzepte verfügbar sind. Aus diesem Grund wurde in 2023 in Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen vom Bereich Gastechologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI zunächst mit theoretischen Betrachtungen für die verfahrenstechnische Auslegung möglicher Anlagenkonzepte zur Spaltung von Ammoniak begonnen. Dabei zeigt sich, dass sich vor allem in Hinblick auf Verfahrenskonzepte, Wärmemanagement, Katalysatorforschung und erzielbare H<sub>2</sub>-Gasreinheiten noch erheblicher Forschungsbedarf besteht und entsprechende Forschungsprojekte auf KIT- und DVGW-Seite sind aktuell in der Antragsphase.

### 1.5.2 Arbeitsgruppe „Chemische Konversion erneuerbarer Energien“

Reinhard Rauch, Wiebke Asbahr, Philipp Graefe, Jonathan Rummel, David Graf

Gesellschaftlich stark debattiert wird derzeit der Verkehrs- und Transportsektor. Mit der favorisierten Elektromobilität rücken 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. Weiterhin werden Sektoren wie Schwerlasttransport oder Flugverkehr nicht auf kohlenstoffhaltige Kraft- und Treibstoffe wegen der hohen Energiedichte verzichten können.

Die Arbeitsgruppe forscht an der Weiterentwicklung von Synthesen für die Herstellung und Aufarbeitung von flüssigen Kohlenwasserstoffen. Im Bereich der Synthese wird an der mehrphasigen Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) gearbeitet, mit Fokus auf CO<sub>2</sub> als Ausgangsstoff sowie Verbesserungen durch Sorbenzien und das dazu nötige Reaktorkonzept. Im Bereich der Aufarbeitung, liegt der Fokus auf Hydroprocessing und der Herstellung von Kerosinfraktionen aus nachhaltigen Zwischenprodukten.

Das Projekt „Refineries for Future“ läuft seit Dezember 2022 und beschäftigt sich mit der Entwicklung, Validierung und Bewertung von möglichen nachhaltigen Raffineriekonzepten. Dabei soll die gesamte Kraftstoffpalette für Straßen-, Flug- und Schiffsverkehr aus den nachhaltigen Ausgangsstoffen Fischer-Tropsch-Crude, Pyrolyseöl, Methanol und Wasserstoff bereitgestellt werden. Im Projekt sollen einzelne Technologiepfade optimiert und verknüpft werden. Die abgeleiteten Raffineriekonzepte werden außerdem ganzheitlich im Hinblick auf ihre Implementierung und einen erfolgreichen Markteintritt betrachtet. Die Arbeitsgruppe „Chemische Konversion erneuerbarer Energien“ unter Prof. Rauch beschäftigt sich am EBI mit den Methanol-basierten Produkten, genauer mit der Aufarbeitung der Schwerbenzinfraction aus dem Methanol-to-Gasoline Prozess zu einer Kerosinblending-Fraktion.

Neben laufenden Forschungsarbeiten ist die AG an einem EU-weiten Projekt zum Informationsaustausch, dem sogenannten Twinning beteiligt. Unter dem Titel „Waste to Hydrogen“ wurden 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 2023 wurden hierzu in Portugal ein Workshop zu neuartigen Technologien rund um Wasserstoff organisiert, zu dem die Gruppe einen Vortrag beisteuerte. Des Weiteren wurde ein „Exploratory visit“ in Italien sowie die finale Konferenz in Portalegre organisiert, für die aus der Arbeitsgruppe zwei Beiträge eingereicht wurden.

### Neues Reaktorkonzept für die sorptionsgestützte Fischer-Tropsch-Synthese

Bei der FTS wird Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>), zu Kohlenwasserstoffen (KWs) und Wasser umgesetzt. Durch eine in-situ Wasserentfernung können drei wesentliche Vorteile im Vergleich zu einer nicht-sorptionsgestützten FTS erzielt werden. Bei der Verwendung eines herkömmlichen FT-Katalysators (Fe- oder Co-basiert) beschleunigt die Anwesenheit von H<sub>2</sub>O die Deaktivierung des Katalysators. Folglich kann durch das Entfernen von Wasser aus der Reaktionszone die Katalysatorlebenszeit verlängert werden. Zudem setzt sich H<sub>2</sub>O an den aktiven Stellen des Katalysators ab und inhibiert dadurch die Reaktion. Das Entfernen von Wasser führt dementsprechend 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<sub>2</sub> unterdrückt und die Reverse-Wasser-Gas-Shift (RWGS) Reaktion zu CO, welches dann zu langkettigen KWs weiterreagiert, begünstigt.

Aus dieser Motivation heraus wurde in der Arbeitsgruppe ein neues Reaktorkonzept für die FTS mit in-situ Wasseradsorption und zusätzlicher -desorption entwickelt (Bild 1.11). Das Konzept besteht aus zwei miteinander verbundenen Suspensionsblasensäulen (engl. Slurry Bubble Column – SBC). Die Suspension setzt sich aus FT-Produkt, -Katalysator und Sorbens zusammen. Eine der SBC wird mit Eduktgas für die FTS durchströmt. Durch Adsorption wird das bei der FT-Reaktion als Nebenprodukt entstehende Wasser aus dem Produktgemisch entfernt. Dadurch können die zuvor genannten Vorteile erreicht werden. Das gesättigte Sorbens zirkuliert nach einer gewissen Verweilzeit in der ersten SBC zusammen mit dem FT-Katalysator in die zweite SBC. Diese wird mit einem Strippgas, z. B.  $H_2$  begast, so dass das Wasser vom Sorbens desorbiert und als beladenes Strippgas die SBC verlässt. Anschließend zirkuliert das regenerierte Sorbens zusammen mit dem FT-Katalysator wieder in die Reaktionsblasensäule. Die Zirkulation der Suspension zwischen den beiden SBCs erfolgt ausschließlich aufgrund von Dichteunterschieden an unterschiedlichen Stellen im Reaktor. Dieses Reaktorprinzip wurde nach aktuellem Stand ausschließlich für rein flüssige Zirkulationsmedien untersucht, nicht aber für Suspensionen.

Für die Untersuchung der FT-Reaktion und in-situ Wasseradsorption steht ein Rührkesselreaktor (RK) mit zusätzlicher Wasserdosierung zur Verfügung. Eine Besonderheit der Laboranlage ist die Möglichkeit, den Wasservolumenanteil im Produktgasstrom mit einem Inline-Diodenlaser-Spektrometer (engl. Tunable Diode Laser – TDL) zu messen. Die Eignung dieser Messmethode im Reaktionsbetrieb wurde nachgewiesen sowie die Bedeutung den Wassergehalt aktiv zu messen und nicht, wie in der Literatur üblich, über eine Bilanz des Sauerstoffs zu bestimmen [1]. Da hier Nebenprodukte in Form von z. B. Alkoholen vernachlässigt werden, entsteht bei höheren Umsätzen eine Abweichung des bilanzierten Wassergehaltes von  $> 10\%$ , was mit den Werten ermittelte Modelle zu

entsprechenden Fehlern führen lässt. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde in einem ersten Schritt die Wasserdosierung sowie -messung in Betrieb genommen und die Wassermassenbilanz der Anlage mit einer maximalen Abweichung  $< 4\%$  geschlossen. Um geeignete Sorbenzien für die sorptionsgestützte FTS zu charakterisieren, wurden die Zeolithe 13X und 4A auf mechanische Stabilität und Adsorptionskapazität im dreiphasigen System überprüft.

Das Zeolith-Pulver 4A weist unter typischen FT-Temperaturen vergleichbare Adsorptionskapazitäten auf wie im zweiphasigen System (Bild 1.12) und konnte als geeignetes Sorbens für die sorptionsgestützte FT-Synthese identifiziert werden. Ein Nachteil von kommerziell hergestellten Zeolithen ist die Verwendung von unbekanntem Anteil an Bindemittel, die im dreiphasigen System herausgelöst werden und die mechanische Stabilität negativ beeinflussen können. Deswegen wird in Zukunft auf bindefreie Zeolith-Pulver zurückgegriffen und erneut die mechanische Stabilität untersucht.

Neben den reaktionstechnischen Aspekten wird ebenfalls an der Fluidynamik geforscht. Dafür steht ein Kaltmodell mit zwei unterschiedlich großen SBC am EBI zur Verfügung. Im Jahr 2023 erfolgte die Inbetriebnahme des Kaltmodells mit Wasser als Zirkulationsmedium. Im darauffolgenden Jahr soll dann eine Suspension mit verschiedenen Partikelkonzentrationen getestet werden. Bild 1.13 zeigt ein Foto des Kaltmodells. Das Ziel der Kaltmodell-Untersuchungen ist es, die Haupteinflussparameter auf den Flüssigkeits- und später Feststoffzirkulationsstrom zu identifizieren und quantifizieren. Dazu gehört der Einfluss des Gasvolumenstroms, ausgedrückt durch die Leerrohrgeschwindigkeit bzw. den Gasgehalt sowie der Einfluss der Reaktorgeometrie. Um letzteres zu untersuchen, können verschiedene Auslasshöhen sowie Schlauchdurchmesser verwendet werden. Ende des Jahres konnte eine erste Versuchsreihe durchgeführt werden, die die Eignung des Reaktorkonzepts bestätigt [2].

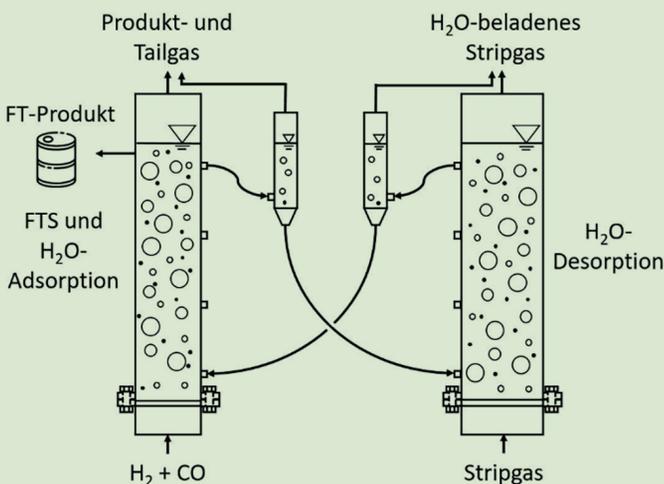


Bild 1.11: Neuartiges Reaktorkonzept für die sorptionsgestützte Fischer-Tropsch-Synthese

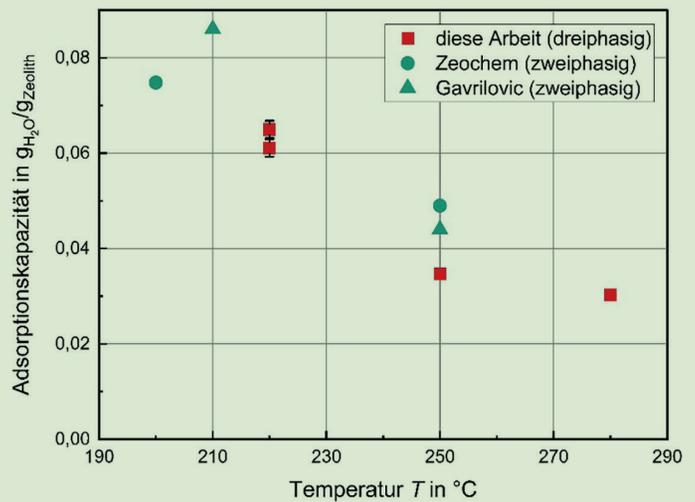


Bild 1.12: Adsorptionskapazität von Zeolith-Pulver 4A bei erhöhten Temperaturen

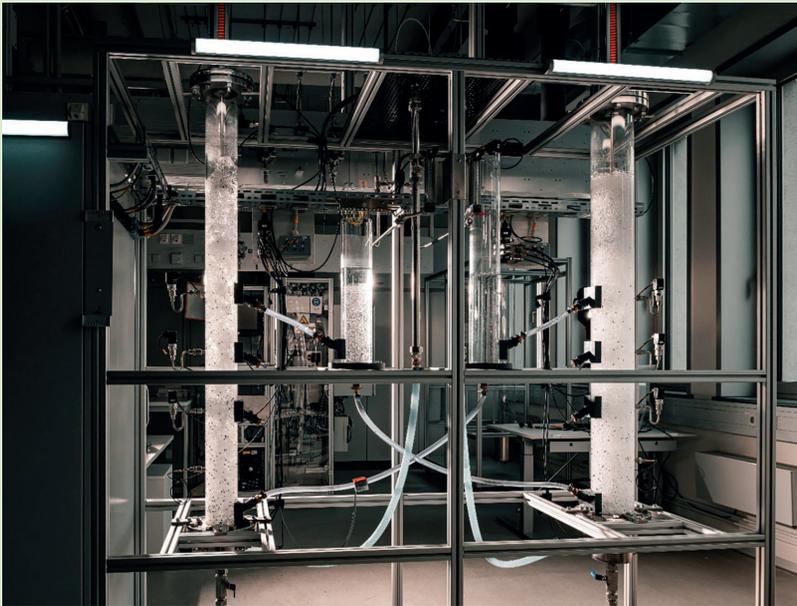


Bild 1.13: Foto des Blasensäulen-Kaltmodells am EBI

Ziel des Jahres 2024 ist es, das Kaltmodell mit einer Suspension zu betreiben und den Feststoffzirkulationsstrom mit einem nachgerüsteten Coriolis-Messgerät zu bestimmen. Neben den Untersuchungen am Kaltmodell soll der „Proof of Concept“ der sorptionsgestützten FTS im dreiphasigen RK erfolgen. Dafür werden bereits getestete Sorbenzien sowie FT-Katalysator bereitgestellt und Synthesegas sowie unterschiedliche Wassermassenströme dosiert.

Die Forschungsarbeiten zur sorptionsgestützten FT-Synthese werden im Rahmen der Dissertation von Frau Wiebke Asbahr (M.Sc.) durchgeführt.

### **Mehrphasige Fischer-Tropsch-Synthese ausgehend von CO und CO<sub>2</sub>**

Die FT-Synthese direkt von CO<sub>2</sub> statt CO als Edukt stattfinden, wenn der verwendete Katalysator ebenfalls die reverse Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS) katalysiert. Dies ist besonders interessant im Zusammenhang mit PtL Prozessen, da CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> als Edukte verwendet werden.

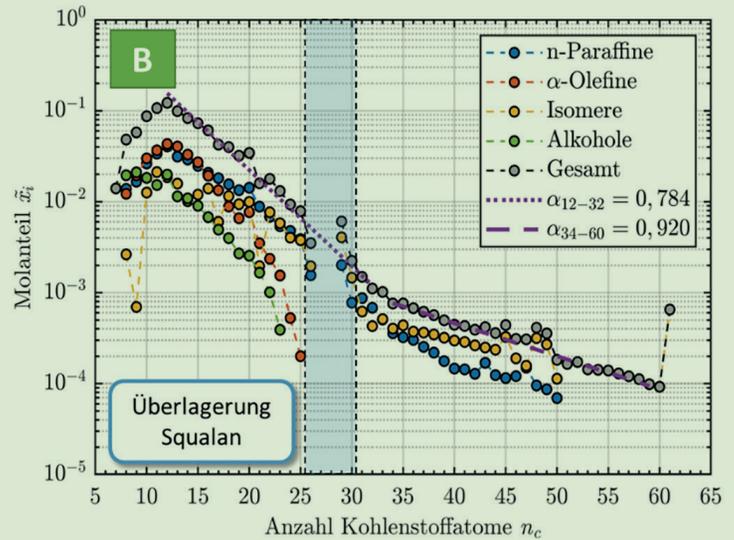
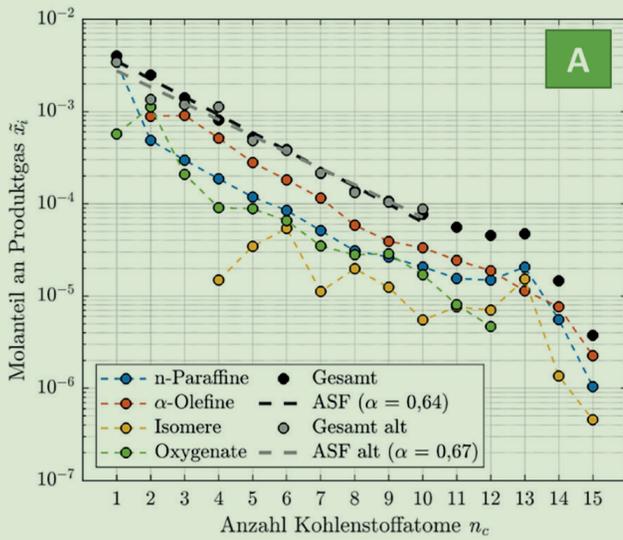
Im Verbundprojekt InnoSyn („Innovative Synthesen flüssiger Energieträger in lastflexiblen Blasensäulen“) wird in der Arbeitsgruppe die mehrphasige direkte FT-Synthese ausgehend von CO<sub>2</sub> untersucht. Der zu untersuchende Katalysator wird am Leibniz-Institut für Katalyse (LIKAT) in Rostock synthetisiert 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.

Die überarbeitete Laboranlage aus Rührkesselreaktor, Gas- und Wasserdosierung, Abscheidern, Gaschromatograph und Diodenlaser zur Bestimmung von H<sub>2</sub>O wurde offiziell im März

2023 in Betrieb genommen und lief über 2000 h im Reaktionsbetrieb der CO<sub>2</sub>-FTS. Bei den verschiedenen Kampagnen wurde primär ein Vollkatalysator aus Fe und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mit K und Cu dotiert, mittels „Organic Combustion“ bei LIKAT hergestellt.

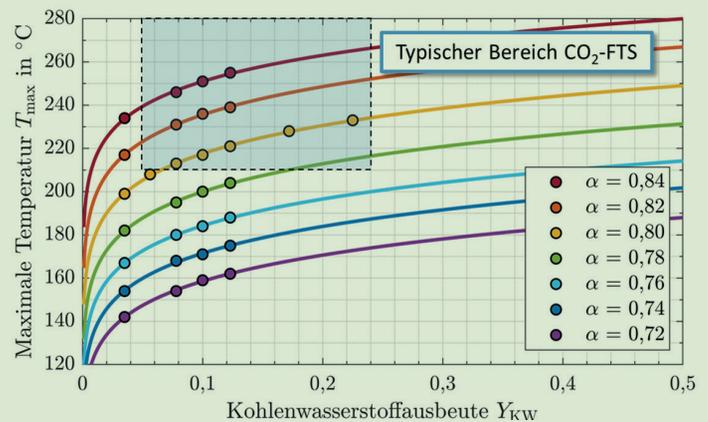
Während der Reaktion entstehen neben n-Paraffinen, welche das Hauptprodukt darstellen, außerdem alpha-Olefine, und diverse Oxygenate. Für den untersuchten Katalysator wurde das Produktspektrum bestimmt und der Gaschromatograph entsprechend kalibriert. In der Produktverteilung (Bild 1.14 a) sind die verschiedenen Produkte logarithmisch über der Kettenlänge dargestellt. Die Steigung der linearen Ausgleichsgerade gibt die Kettenwachstumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  wieder, ein wichtiges Maß für die Selektivität des Katalysators.

Man erkennt einen hohen Anteil an Oxygenaten von ~35 Gew.-% sowie eine vergleichbare Kettenlängenverteilung für jede Gruppe. Der hohe Anteil an Alkoholen stellt eine Wertsteigerung der Produkte gegenüber der kommerziellen CO-FTS dar. Vermehrt produzierte, kurzkettige Olefine sind zudem wichtige Zwischenprodukte der chemischen Industrie, die mittels CO<sub>2</sub>-FTS nachhaltig hergestellt werden können. Die Analyse der langkettigen Produkte (Wachse) wurde erstmalig erfolgreich für die 3-phasige Synthese am Institut durchgeführt (Bild 1.14 b). Hierbei wurde eine Abnahme der Nebenprodukte ab C<sub>25</sub> gefunden, sowie eine stark erhöhte Kettenwachstumswahrscheinlichkeit ab C<sub>32</sub>. Diese wird in der Literatur meist durch Diffusionslimitierungen aufgrund der Molekülgröße erklärt sowie des daraus resultierenden niedrigen Dampfdrucks. Somit verbleiben diese Moleküle länger am Katalysator und werden durchhydriert (Mangel an Oxygenaten und Olefinen) und nehmen an weiterem Kettenwachstum teil.



**Bild 1.14:** Produktverteilung der Gasphase (A) und Wachsprobe (B) aus einer CO<sub>2</sub>-FT Kampagne mit Squalan als Flüssigphase. Reaktionsbedingungen (A) T<sub>R</sub> = 250 °C, p<sub>R</sub> = 25 bar, (H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>)<sub>Ed</sub> = 3, GHSV = 1800 ml g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Reaktionsbedingungen (B) T<sub>R</sub> = 210 °C, p<sub>R</sub> = 30 bar, (H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>)<sub>Ed</sub> = 3, GHSV = 600 ml g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, Probe 1:9 gelöst in Cyclohexan

**Bild 1.15:** Stabilität der dreiphasigen CO<sub>2</sub>-FTS bei 30 bar. Maximale Temperatur zur Kondensation von 0,1% der gebildeten Kohlenwasserstoffe. Gasphase vor Reaktor (H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) = 3. Produktverteilung mit Nebenprodukten bis C30: x<sub>Paraffin</sub>/x<sub>Olefin</sub>/x<sub>Alkohol</sub>/x<sub>Säure</sub> = 0,31/0,38/0,155/0,155. Ab C31 nur Paraffine



Neben der Produktverteilung wurde ebenfalls ein SBCR anhand von Literaturkinetiken modelliert. Hierfür wurde ein bestehendes axiales Dispersionsmodell aus der dreiphasigen Methanisierung an die Stoffe, Reaktionen und Bedingungen der CO<sub>2</sub>-FTS angepasst. Die Validierung sollte anhand eines Langzeitversuchs geschehen. Im zugehörigen Reaktionsbetrieb konnte ein stabiler Betriebspunkt bei 230 °C für 500 h gehalten werden. Bei diesen Bedingungen stellte sich eine Kohlenwasserstoffausbeute von ~ 8% ein bei einer Kettenwachstumswahrscheinlichkeit von 0,74. Hier konnte zu Ende der Kampagne ebenfalls der positive Effekt von CO-co-feeding bestätigt werden, der bereits für einen zuvor untersuchten Katalysator eine Verdopplung der Ausbeute sowie Steigerung der Kettenwachstumswahrscheinlichkeit bewirkte [3].

Der Flüssigkeitsstand im Reaktor nahm permanent ab, was einen technischen Betrieb bei diesen Bedingungen unmöglich macht. Zur näheren Untersuchung von technisch relevanten Betriebspunkten wurde eine thermodynamische Model-

lierung in AspenPlus durchgeführt. Hiermit soll abhängig von Produktivität (Y<sub>KW</sub>) und Selektivität (α) die maximal zulässige Betriebstemperatur ermittelt werden, bei der im stationären Betrieb gerade noch eine Flüssigphase im Reaktor vorliegt, i.e. mehr Flüssigkeit produziert wird als verdampft. Das Ergebnis ist in **Bild 1.15** zu sehen.

Es ist zu erkennen, dass für typische CO<sub>2</sub>-FTS Bedingungen die Kettenwachstumswahrscheinlichkeit einen größeren Einfluss hat als die Produktivität und Erstere bei mindestens 0,8 liegen sollte. Diese Erkenntnis ist essenziell für die Weiterentwicklung des eingesetzten Katalysators. Eine verminderte Aktivität des Katalysators zugunsten der Selektivität bringt den weiteren Vorteil mit sich, dass weniger Wasser produziert wird, was in einigen Kampagnen ab ~11% zu Katalysatordeaktivierung geführt hat. Anhand von Messungen der Partikelgrößenverteilung vor und nach Reaktionsbetrieb stellte sich heraus, dass die mechanische Stabilität des verwendeten Katalysators nicht ausreichend für den

größtechnischen Betrieb in SBCR ist. Die Ursache soll mittels Analyse verschiedener Partikelgrößenverteilung abhängig von Reaktions-/Abriebsbedingungen näher untersucht werden.

In zukünftigen Kampagnen werden weitere Katalysatorsysteme vermessen und die Parameterstudie zu einer kinetischen Studie ausgeweitet. Ferner wird der deaktivierende und inhibierende Effekt von H<sub>2</sub>O sowie die in-situ Reduzierbarkeit durch das Zusammenspiel von H<sub>2</sub>O-Dosierung und in-situ Messung mittels TDL experimentell ergründet. Kinetische Modelle werden erweitert, um das ermittelte Produktspektrum zu beschreiben und in das axiale Dispersionsmodell für SBCR integriert. Abschließend soll ein kompletter CO<sub>2</sub>-FT-Prozess ausgehend von Elektrolyse und Direct-air capture modelliert und energetisch optimiert werden.

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

### **Hydroprocessing von nachhaltigen Zwischenprodukten zu Kerosin**

Bei der Begrenzung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor erfährt die Flugindustrie besondere Aufmerksamkeit, da die Möglichkeiten der Dekarbonisierung des Sektors nach wie vor begrenzt sind. Die ReFuelEU Aviation Verordnung sieht vor, in Zukunft verstärkt auf nachhaltige flüssige Treibstoffe (Sustainable Aviation Fuels - SAF) zu setzen. Bis 2025 soll der Anteil an SAF an europäischen Flughäfen bei 2 % liegen. Vorgesehen ist eine stufenweise Erhöhung des SAF-Anteils auf 70 % bis 2050. Die Bereitstellung von SAF erfolgt hauptsächlich durch Biomass-to-Liquid (BtL) und Power-to-Liquid (PtL) Verfahren. Diese erfordern jedoch oft weitere Aufarbeitung oder Blending, um normgerechte Flugzeugtreibstoffe zu erhalten. Hydroprocessing-Verfahren sind entscheidend für die Aufarbeitung von SAF und beinhalten verschiedene katalytische Reaktionen wie Hydrieren, Hydrotreating, Hydroisomerisieren und Hydrocracking.

Am EBI werden an einer bestehenden Hydroprocessing-Anlage (Betriebsbedingungen bis zu 500 °C und 200 bar im Produktionsmaßstab 1 L·d<sup>-1</sup>) Kerosinfraktionen aus nachhaltig produzierten Zwischenprodukten bereitgestellt, analysiert und die Nutzbarkeit als SAF Drop-In bzw. Blending-Komponenten bewertet. Dazu sollen verschiedene Einsatzstoffe aus Methanol-to-X- (MtX), Fischer-Tropsch- (FT) oder Pyrolyse-Prozessen genutzt und verglichen werden. Die bestehende Anlage am EBI wurde zunächst wieder in Betrieb genommen und Heizungen, Filter und Verrohrungen getauscht. Zusätzlich wurden wichtige Anlagenteile wie die Online-GC zur Abgasanalytik, die Hochdruckdosierpumpe und die MFC's zur Gasdosierung rekaliibriert. Die ersten Arbeiten beschäftigen sich mit der Aufarbeitung der Schwerbenzinfraction des MtG-Prozesses. Dazu sind 60 L Schwerbenzin vom Industriepartner CAC zur Verfügung gestellt worden. Das Schwerbenzin besteht hauptsächlich aus C9 und C10 Aromaten und befindet sich im Siedeverhalten bereits am unteren

Ende des Kerosinsiedebereichs. Beim Hydroprocessing sollen daher Crackingreaktionen vermieden werden und der Fokus auf mildem Hydrieren zu C9 und C10 Naphtenen liegen. Diese Moleküle liegen im Vergleich zu vielen Paraffinen noch in einem für eine Kerosinblendingkomponente vertretbaren Siedebereich von 140 - 175 °C, weisen aber ein deutlich besseres Rußverhalten als Aromaten auf.

Für die Analytik von komplexen Kohlenwasserstoffmischungen wurde ein GCxGC-System am EBI angeschafft. In Absprache mit dem Ref4Fu-Partner ASG wurden wichtige Systemparameter wie Sampler, Injektor, Modulator, Säulenkombination, Splitter, Detektoren und Software abgewogen und festgelegt. Angeschafft wurde ein GCxGC-MS-System von JSB mit Agilent Technologie. Das Gerät wurde am EBI installiert und steht zur Kalibration und Analytik von Produkten aus der Hydroprocessing-Anlage bereit.

Die Forschungsarbeiten zum Hydroprocessing von nachhaltigen Zwischenprodukten zu Kerosin werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn Jonathan Rummel (M.Sc.) durchgeführt.

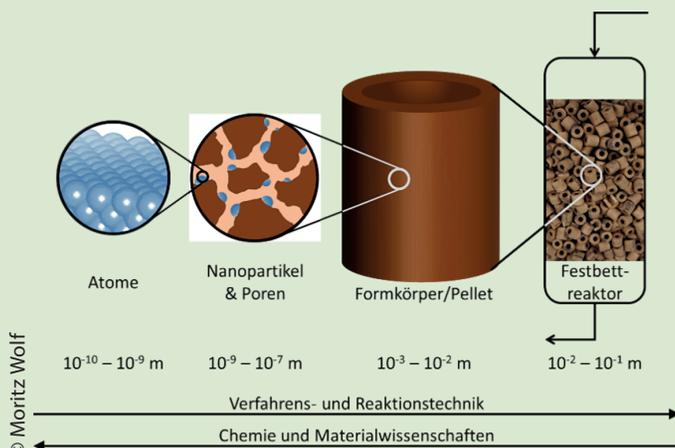
### Literatur

- [1] Graefe, P.; Asbahr, W.; Rauch, R.: Three-Phase CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch Synthesis - In-Line Quantification of Water by Tunable Diode Laser Spectroscopy; in 14<sup>th</sup> European Congress of Chemical Engineering (ECCE 2023), Berlin, 2023.
- [2] Graefe, P.; Honold, V.; Rauch, R.: Effects of Co-Feeding CO on Catalyst Activity and Selectivity in Three-Phase CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch Synthesis; in Waste to Hydrogen Final Conference, Portalegre, 2023
- [3] Graefe, P.; Honold, V.; Rauch, R.: Effects of Co-Feeding CO on Catalyst Activity and Selectivity in Three-Phase CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch Synthesis; in Waste to Hydrogen Final Conference, Portalegre, 2023

### 1.5.3 Arbeitsgruppe „Materialsynthese und Scale-up“

Moritz Wolf

Die Arbeitsgruppe „Materialsynthese und Scale-up“ von TT-Prof. Dr. Moritz Wolf (EBI-ceb, Professur Katalysatormaterialien für die Energiewende) ist am Institut für Katalyseforschung und -technologie (IKFT) am Campus Nord des KIT verortet und befindet sich seit Mai 2022 im Aufbau. Der Schwerpunkt der Arbeitsgruppe liegt auf der Entwicklung von Katalysatoren und Technologien für die chemische Energiespeicherung als wesentliches Kernelement einer erfolgreichen Energiewende. Darüber hinaus wird die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) bei der Herstellung industrieller Grundchemikalien, einem wichtigen Bestandteil einer Kreislaufwirtschaft, untersucht. Die chemische Wasserstoffspeicherung für einen sicheren und energiedichten Transport, die Aufwertung von Kohlenstoffdioxid und die klimaneutrale Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, insbesondere nachhaltigem Kerosin, sind somit Kernthemen des Forschungsgebiets der Arbeitsgruppe. Die Speicherung von erzeugten erneuerbaren Energien mit typischerweise stark fluktuierendem Charakter in chemischen Energieträgern



© Moritz Wolf

**Bild 1.16:** Maßstabsübergreifender und interdisziplinärer Ansatz in der Katalyseforschung

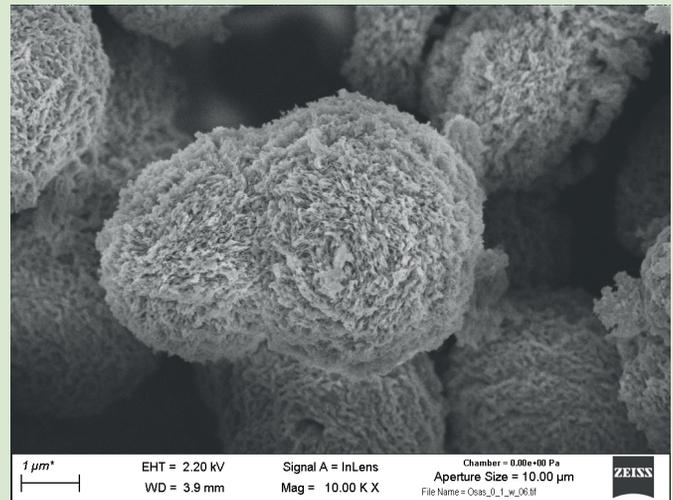
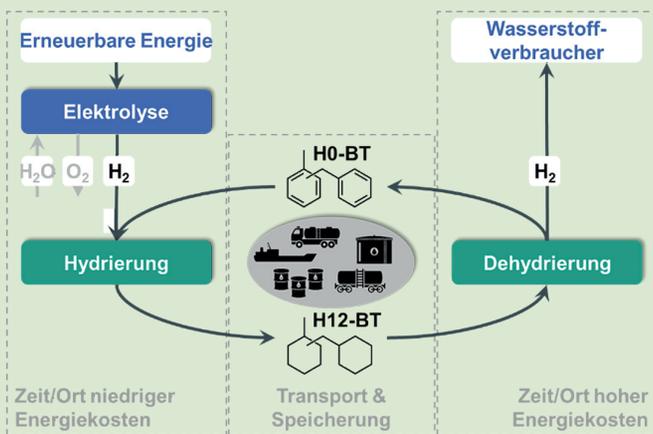


Bild: Dr. Michael Zimmermann

**Bild 1.18:** Sphärisches  $C_3N_4$  unter dem Rasterelektronenmikroskop

◀ **Bild 1.17:** Kreislaufwirtschaftliche Nutzung von flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHCs) für die Speicherung und den weltweiten Transport von Wasserstoff mit dem Trägermolekül Benzyltoluol (H0-BT); Bild: adaptiert von E. Herzinger, M. Wolf (2024), Perspectives and Potential of Liquid Organic Hydrogen Carriers in the German Energy Scenario, Chemie Ingenieur Technik, 96, 65-73

erlaubt nicht nur eine mittel- und langfristige Umwandlung, sondern ermöglicht auch den weltweiten Transport solcher gewonnenen Energieeinheiten aus Regionen mit günstigeren Rahmenbedingungen als beispielsweise in Deutschland. Diese neuen technologischen Herausforderungen können ebenso wie die nachhaltige wirtschaftliche Produktion von industriellen Grundchemikalien nur mit neuen Katalysatormaterialien und katalytischen Verfahren gelingen. Daher kombinieren wir grundlegende Arbeiten und angewandte Forschung, um signifikante Verbesserungen bei Energiespeichertechnologien zu erreichen. Diese Forschung verfolgt einen interdisziplinären Ansatz zwischen Katalyse, Ingenieur- und Materialwissenschaften (**Bild 1.16**).

**Chemische Energiespeicherung mittels flüssiger organischer Wasserstoffträger (Liquid organic hydrogen carriers; LOHCs)**

Die LOHC-Technologie umgeht den Transport und die Lagerung von leicht entzündlichem molekularem Wasserstoff. Aromatische Moleküle wie Benzyltoluol (H0-BT) können reversibel zu Perhydrobenzyltoluol (H12-BT) hydriert und wieder zu H0-BT dehydriert werden (**Bild 1.17**), um Wasserstoff

chemisch in Form dieser in Flüssigkeit zu speichern und zu transportieren. Diese LOHCs sind nicht brennbar, haben eine geringe Toxizität, liegen in einem breiten Temperaturbereich als Flüssigkeit vor und haben eine hohe volumetrische Speicherdichte für Wasserstoff. Darüber hinaus kann für die chemische Speicherung von Wasserstoff die bestehende Infrastruktur für flüssige Kraftstoffe (Diesel, Benzin) genutzt werden, was sichere und einfache globale Lieferketten mit schneller Umsetzung ermöglicht. Die technische Freisetzung von Wasserstoff erfordert aufgrund des stark endothermen Charakters der Dehydrierungsreaktion relativ hohe Reaktionstemperaturen. Das Hauptforschungsgebiet befasst sich daher mit der Freisetzung von Wasserstoff aus LOHCs mittels heterogen katalysierter Dehydrierung. Dieses Thema umfasst die Entwicklung und das Scale-Up der Synthese neuartiger Katalysatoren und deren Einsatz in verschiedenen Reaktor-konzepten. Darüber hinaus werden neue Prozessrouten für eine verbesserte Effizienz untersucht.

**Neuartige Katalysatormaterialien für die CO<sub>2</sub>-Aktivierung**  
Das Projekt zielt darauf ab, potenziell vorteilhafte Synergieeffekte beim Einsatz von Nitrid-modifizierten Trägermaterialien

in heterogenen Katalysatoren für die Umwandlung von CO<sub>2</sub> zu identifizieren und zu nutzen. Ziel der Forschung ist die Entwicklung von Katalysatoren auf Basis von Übergangsmetallen mit Kohlenstoffnitrid-basierten (C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) oder -modifizierten Trägermaterialien. Die synergetische Wirkung von C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> und/oder Derivaten auf die Katalyse kann die Aktivität, die Selektivität oder die Stabilität im Vergleich zu Standardträgermaterialien erhöhen. Aktuell wird C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in unterschiedlicher Morphologie synthetisiert (Bild 1.18). Die hergestellten Nitridmaterialien werden anschließend mit separat synthetisierten Nanopartikeln besetzt, was zu einstellbaren heterogenen Modellkatalysatoren führt, welche in der Hydrierung von CO<sub>2</sub> zu kurzkettenigen Kohlenwasserstoffen getestet werden.

### Produktion von nachhaltigem Kerosin

Das Projekt CARE-O-SENE (<https://care-o-sene.com/>) wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und verbindet sieben deutsche und südafrikanische Projektpartner: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), INERATEC, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Sasol Germany GmbH, Sasol Limited und University of Cape Town (UCT). Gemeinsam werden optimierte Katalysatoren für die Herstellung von grünem Kerosin untersucht und weiterentwickelt. CARE-O-SENE wird somit eine Schlüsselrolle bei der nachhaltigen Umstellung von Branchen wie der Luftfahrt spielen. Ziel ist die wirtschaftlichere und attraktivere Produktion von umweltfreundlichem Kerosin als Kraftstoffalternative. Unser Beitrag zu diesem Projekt ist die Entwicklung und Herstellung von Modellkatalysatoren, um mittels fortschrittlicher Charakterisierungstechniken Einblicke in strukturelle Abhängigkeiten und Funktionsprinzipien zu gewinnen.

### Induktive Beheizung von Katalysatoren

Das assoziierte Projekt „Inductive heating of catalysts and novel reactor designs“ untersucht im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 1441 (<https://www.trackact.kit.edu/>) „Tracking the Active Site in Heterogeneous Catalysis for Emission Control“ die Anwendung elektromagnetischer induktiver Beheizung als aufstrebende Heiztechnologie in katalytischen Anwendungen. Abgesehen von dem enormen Potenzial, die Elektrifizierung industrieller Prozesse generell voranzutreiben, ermöglicht die induktive Beheizung eine Prozessintensivierung, kann die Energieeffizienz steigern und stellt ein hochdynamisches Beheizungskonzept dar. In diesem Projekt wird die Anwendung der induktiven Beheizung von Katalysatoren für die Emissionskontrolle mit mehreren skalenergreifenden Ansätzen erforscht, welche von Laborreaktoren bis in den Nanometerbereich reichen.

### 1.5.4 Arbeitsgruppe „Thermo-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung“

Thomas Kolb, 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 unterstützt 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 im Besonderen auf den Grundlagen der Vergasung von Festbrennstoffen und der Umsetzung biogener Pyrolyseöle.

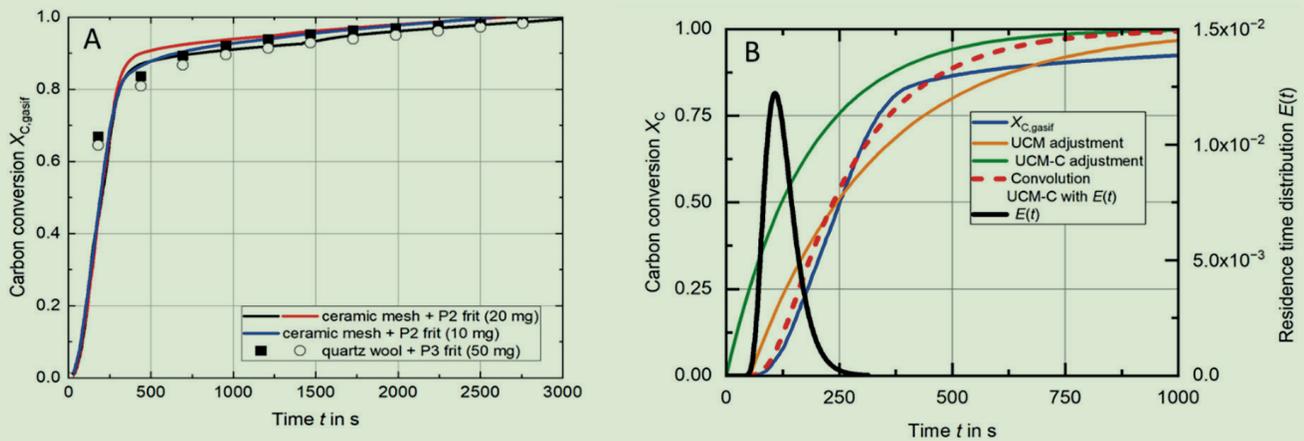
### Kinetik der Feststoffvergasung von biogenem Koks

Bei der Flugstromvergasung werden feste Brennstoff-Partikel mit Wasserdampf und/oder CO<sub>2</sub> zu Synthesegas umgesetzt. Am EBI ceb wird das Vergasungsverhalten von festen Zwischenprodukten der Flugstromvergasung im differentiellen Festbettreaktor untersucht. Die Arbeiten werden von Stella Walker im Rahmen ihrer Promotion durchgeführt.

Im Jahresbericht 2022 wurden Ergebnisse reaktionskinetischer Messungen im differentiellen Festbettreaktor zur Wasserdampf-Kinetik zweier Holzkoks-Qualitäten (P1400 und P1600) vorgestellt. Der Zusammenhang zwischen Reaktionstemperatur und Wasserdampf-Partialdruck war hier nicht eindeutig. Daraus wurde die Notwendigkeit abgeleitet, Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der experimentellen Ergebnisse, zur Sicherstellung des differentiellen Betriebs des Festbettreaktors und zu weiteren Einflussfaktoren wie dem Systemantwortverhalten vorzunehmen.

Die Reproduzierbarkeit wurde anhand von mehreren Faktoren untersucht. Zum einen wurde die eingesetzte Probenmasse zwischen 10 mg und 50 mg variiert. Zum anderen wurden unterschiedliche Bauarten der Probenhalterung aus Quarzglas getestet, da diese großen Einfluss auf die Umströmung der Partikel mit Reaktionsgas haben. Die Experimente aus 2023 wurden mit den Experimenten aus 2022 verglichen. Bild 1.19 a zeigt einen Vergleich der berechneten Umsätze eines Vergasungsexperiments bei 870 °C, 20 bar Gesamtdruck und 12,5 bar Wasserdampfpartialdruck, zum einen aus 2022 (Datenpunkte) und aus 2023 (Linien). Während 2022 noch mit einem Gaschromatographen die Wasserstoff-Konzentration bestimmt wurde, wurde 2023 mit einem Massenspektrometer gearbeitet, um eine quasi-kontinuierliche Messung zu realisieren. Anhand von Bild 1.19 a ist zu erkennen, dass sich die experimentellen Daten unabhängig von der eingewogenen Probenmasse und der Probenhalterung und auch unabhängig vom eingesetzten Gasanalysator sehr gut reproduzieren lassen.

Der differentielle Betrieb des Festbettreaktors ist gegeben, wenn sich die Reaktionsgaszusammensetzung zwischen



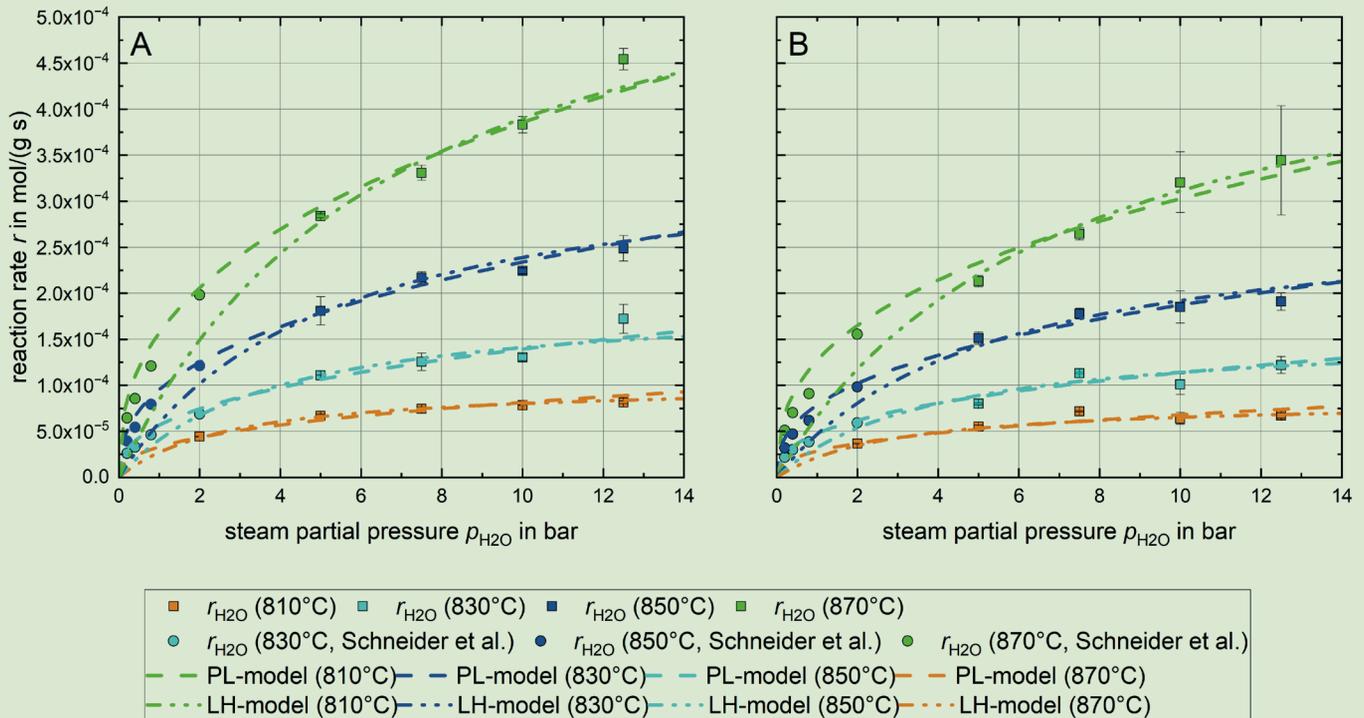
**Bild 1.19:** Vergasungsexperimente bei 870 °C, 20 bar Gesamtdruck und 12,5 bar Wasserdampfpartialdruck: A) Vergleich verschiedener Experimente mit unterschiedlichen Probenhalterungen (Linien: Experimente 2023, Punkte: Experimente 2022); B) Experimentell ermittelter Umsatz eines Experiments, Verweilzeitverteilung  $E(t)$  und Vergleich der Auswertung mit und ohne Berücksichtigung des Systemantwortverhaltens (Holzkoks-Qualität P1400)

Reaktor-Einlass und Auslass nur so wenig ändert, dass der Einfluss dieser Änderung auf die ermittelte Reaktionsgeschwindigkeit vernachlässigbar ist. Da hierfür in der Literatur keine einheitlichen Kriterien zu finden sind, wurde ein eigenes Kriterium auf Basis der Damköhler-Zahl entwickelt, die das Verhältnis des konvektiven Stofftransports zur Geschwindigkeit der heterogenen Reaktion im Festbett beschreibt. Es zeigte sich, dass für das Verhältnis von ein- zu austretender Reaktionsgaskonzentration  $c_{aus}/c_{ein} = 0,9$  der differentielle Betrieb angenommen werden kann. Das Kriterium wurde für alle Experimente eingehalten. Dies deckte sich auch mit der zuvor geschilderten Beobachtung, dass die eingewogene Probenmasse den zeitlichen Verlauf des Umsatzes nicht beeinflusst hat.

Das Systemantwortverhalten beeinflusst den experimentell ermittelten Umsatz insbesondere dann, wenn die Zeitskalen von Systemantwortzeit und Verweilzeitverteilung im System ähnlich groß sind, wie die Dauer des Partikelumsatzes. Der Kehrwert der Reaktivität,  $1/RX$ , wird für letztere als einheitliches Maß verwendet (Stoesser et al., 2018). Das Verweilzeitverhalten wurde in Zusammenarbeit mit Professor Sonia Rincón Prat von der Universidad Nacional de Colombia während ihres Aufenthalts als Gaswissenschaftlerin am EBI ceb daher für relevante Bedingungen im Hinblick auf Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung mittels Sprungversuchen untersucht. Der Vergleich ergab vor allem für hohe Umsatzraten bei Experimenten mit hohem Wasserdampfpartialdruck und bei hohen Temperaturen eine große Ähnlichkeit zwischen der Verweilzeitverteilung und  $1/RX$ . Da diese Beobachtung einen vielversprechenden Erklärungsansatz für die 2022 festgestellten Unstimmigkeiten darstellte, wurde eine Methode zur Berücksichtigung des Systemantwortverhaltens bei der Auswertung der experimentellen Daten entwickelt. Hierzu wurden die experimentell bestimm-

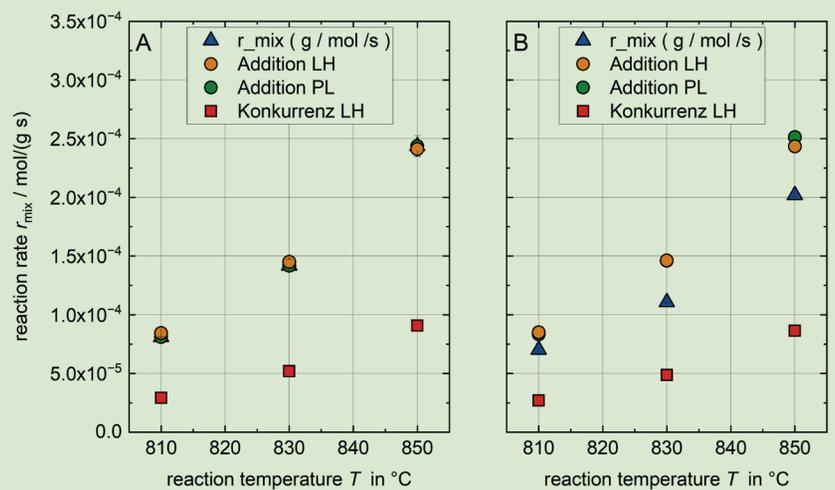
ten Sprungantworten mit dem axialen Dispersionsmodell modelliert. Das Modell wurde in Kombination mit einem Partikelumsatzmodell in die Auswertung der experimentellen Daten zur Ermittlung einer Reaktionsgeschwindigkeit integriert. **Bild 1.19 b** zeigt beispielhaft den experimentell ermittelten Umsatz  $X_{C, gasif}$  eines Experiments mit einer der beiden Holzkoks-Qualitäten bei einem Wasserdampfpartialdruck von 12,5 bar und einer Temperatur von 870 °C und die den Bedingungen entsprechende Verweilzeitverteilung  $E(t)$ . Der experimentell ermittelte Umsatz wurde einmal direkt mittels Partikelmodell ausgewertet (orange, UCM adjustment) und einmal mittels Partikelmodell und Systemantwortverhalten (grün, UCM-C adjustment). Die Modellierung mittels Partikelmodell und Systemantwortverhalten wurde dann durch die Faltung der resultierenden Kurve (grün, UCM-C adjustment) und mit der Verweilzeitverteilung  $E(t)$  überprüft (rote, gestrichelte Kurve, Convolution). Es ist zu erkennen, dass die Anpassung mittels Partikelmodell und Systemantwortverhalten den experimentell ermittelten Umsatz deutlich besser beschreibt als das reine Partikelmodell.

Die Experimente wurden daher unter Berücksichtigung des Systemantwortverhaltens neu ausgewertet. **Bild 1.20** zeigt die so bestimmten Reaktionsgeschwindigkeiten der Vergasungsexperimente bei unterschiedlichen Wasserdampfpartialdrücken der beiden Holzkoks-Qualitäten. Zudem sind auch die im Rahmen der Promotionsarbeit von Christoph Schneider bestimmten Reaktionsgeschwindigkeiten der beiden Holzkoks-Qualitäten bei niedrigen Wasserdampfpartialdrücken gezeigt. Die Modelle zur Beschreibung der Reaktionskinetik, das Power-Law-Modell (PL-modell) und das Langmuir-Hinshelwood-Modell (LH-modell) wurden allerdings nur an die neuen Experimente bei höheren Wasserdampfpartialdrücken angepasst. Es ist zu erkennen, dass für beide Holz-



▲ **Bild 1.20:** Kinetik der heterogenen Wassergas-Reaktion der beiden Holzkoks-Qualitäten P1400 (A) und P1600 (B): Experimentell bestimmte Reaktionsgeschwindigkeiten der vorgestellten Arbeit und der vorhergehenden Arbeit [1] sowie angepasste Kinetik-Modelle (Power-Law-Modell „PL“ und Langmuir-Hinshelwood-Modell „LH“)

► **Bild 1.21:** Reaktionsgeschwindigkeiten der Koks-Qualität P1400 bei 4,5 bar Wasserdampfpartialdruck und 9 bar (A) bzw. 14,5 bar  $CO_2$ -Partialdruck für 810 °C, 830 °C und 850 °C sowie modelliertes additives und konkurrierendes Verhalten von  $H_2O$  und  $CO_2$  basierend auf den Langmuir-Hinshelwood- bzw. Power-Law-Ansätzen der Kinetik in  $H_2O$  oder  $CO_2$  [2]



koks-Qualitäten das Power-Law-Modell auch die Reaktionsgeschwindigkeiten aus der Vorgängerarbeit sehr gut beschreibt.

Somit wurde durch die Auswertung unter Berücksichtigung des Systemantwortverhaltens eine geeignete Auswertemethode gefunden und eine Wasserdampf-Kinetik für die Holzkoks-Qualitäten bestimmt, die das Vergasungsverhalten für den Bereich von 0 – 12,5 bar Wasserdampfpartialdruck sehr gut beschreiben kann.

Da die Beschreibung der Kinetik der heterogenen Wassergas-Reaktion für die beiden Holzkoks-Qualitäten damit zufriedenstellend abgeschlossen werden konnte, wurden im nächs-

ten Schritt weitere Experimente im Gemisch aus Wasserdampf und  $CO_2$  unter Druck durchgeführt. Hierbei wurden fünf Versuchspunkte eingestellt, bei denen jeweils der  $CO_2$ -Partialdruck bis zu 20 bar und der Wasserdampfpartialdruck bis zu 12,5 bar variiert wurde. Anhand eines Vergleichs der experimentell bestimmten Reaktionsgeschwindigkeiten mit Modellen zur Beschreibung von konkurrierendem oder additivem Verhalten der Moleküle  $CO_2$  und  $H_2O$  können Aussagen zum Zusammenwirken von  $CO_2$  und  $H_2O$  in der Vergasung unter Druck getroffen werden. Dies soll anhand eines Beispiels gezeigt werden. **Bild 1.21** zeigt die experimentell bestimmten Reaktionsgeschwindigkeiten im Gemisch ( $r_{mix}$ )

sowie die entsprechenden Modelle für die Holzkoks-Qualität P1400 bei 4,5 bar Wasserdampfpartialdruck und 9 bar (Bild 1.21 a) bzw. 14,5 bar (Bild 1.21 b) CO<sub>2</sub>-Partialdruck. Für den niedrigeren CO<sub>2</sub>-Partialdruck kann die Reaktionsgeschwindigkeit durch einen additiven Ansatz sehr gut beschrieben werden. Deutlich zu erkennen ist, dass bei einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks die Reaktionsgeschwindigkeit abnimmt und nicht mehr durch ein additives Modell beschreibbar ist. Dies deutet auf ein konkurrierendes Verhalten von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O mit einer Dominanz von CO<sub>2</sub> hin, d.h. bei höheren CO<sub>2</sub>-Partialdrücken verdrängen die CO<sub>2</sub>-Moleküle die H<sub>2</sub>O-Moleküle von deren reaktiven Zentren. Im Vergleich zur Reaktionsgeschwindigkeit im Fall A können also weniger H<sub>2</sub>O-Moleküle an der Reaktion teilnehmen. Dadurch sinkt die Reaktionsgeschwindigkeit, da die Reaktionskinetik in Wasserdampf deutlich schneller ist, als in CO<sub>2</sub>.

Literatur

- [1] Stoesser, P.; Schneider, C.; Kreitzberg, T.; Kneer, R.; Kolb, T.: On the influence of different experimental systems on measured heterogeneous gasification kinetics; Applied Energy, Bd. 211, Nr. 4, S. 582–589, Jan. 2018;
- [2] Schneider, C.; Zeller, M.; Böhm, D.; Kolb, T.: Influence of pressure on the gasification kinetics of two high-temperature beech wood chars with CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and its mixture; Fuel, Bd. 299, Nr. 3, S. 120523, Jan. 2021.

1.5.5 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 Bereit-

stellung 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 CO<sub>2</sub> aus unterschiedlichen Quellen für PtX-Prozesse dar. Außerdem werden grundlegende Untersuchungen zu Hydrodynamik und Stoffübergang in Dreiphasen-Systemen wie Füllkörperkolonnen oder Blasensäulenreaktoren durchgeführt.

Im BMBF-geförderten Projekt InnoSyn (Innovative Syntheseprozesse zur Erzeugung chemischer Energieträger aus grünem Wasserstoff in lastflexiblen Blasensäulenreaktoren) wird die Entwicklung zweier Syntheseverfahren zur Umsetzung von grünem Wasserstoff in erneuerbare chemische Energieträger mittels Blasensäulenreaktoren untersucht (Bild 1.22).

Ein Schwerpunkt stellt die Hydrodynamik der Blasensäulenreaktoren dar, mit dem Ziel die Verlässlichkeit der fluiddynamischen Auslegung der Reaktoren zu verbessern. Hierzu wurde eine Glasblasensäule mit einem Innendurchmesser von 200 mm und einer Höhe von 2,2 m im Technikum des EBI in Betrieb genommen.

In der ersten experimentellen Phase des Projekts wurden integrale Gasgehaltsmessungen mithilfe einer Füllstandsmessung bei unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten mit dem Stoffsystem Wasser/Luft durchgeführt. Hierbei konnte durch einen Vergleich mit vergangenen Arbeiten mit Blasensäulen mit kleinerem Durchmesser der Einfluss des Blasensäulendurchmessers untersucht werden. Zudem wurde der Einfluss anderer Randparameter wie beispielweise die Qualität des Wassers oder die Geometrie des Gasverteilers untersucht.

In der Restlaufzeit des Projekts werden nun noch Messungen mit einer Nadelsonde durchgeführt, um die Hydrodynamik auch lokal über den Blasensäulenquerschnitt auflösen zu können. Zudem werden andere Flüssigkeiten eingesetzt, um den Einfluss der Stoffeigenschaften gezielt untersuchen zu können.

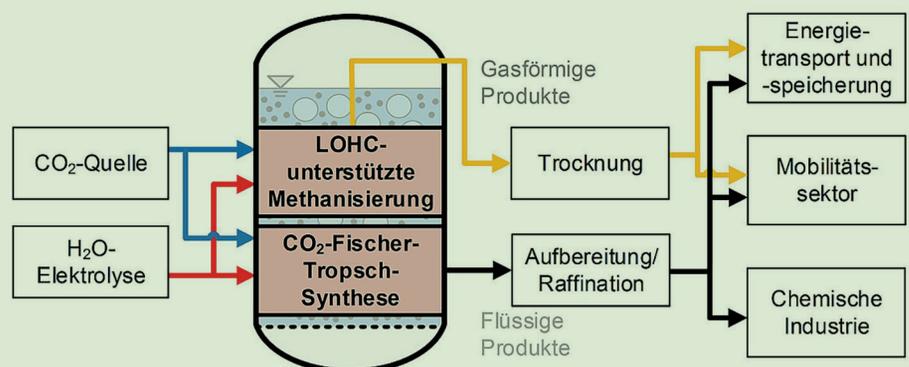


Bild 1.22: Darstellung der im Verbundvorhaben InnoSyn untersuchten Syntheseverfahren in Blasensäulenreaktoren und die Anwendungsgebiete der Produkte in Form eines Blockfließbilds

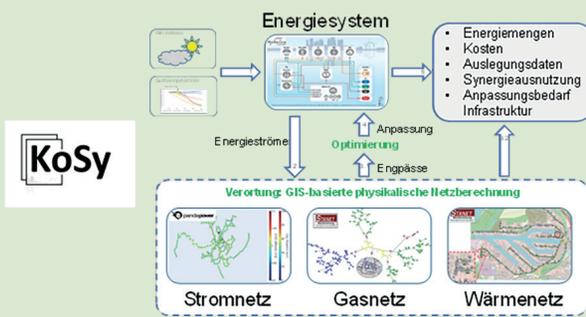


Bild 1.23: Modellarchitektur KoSy

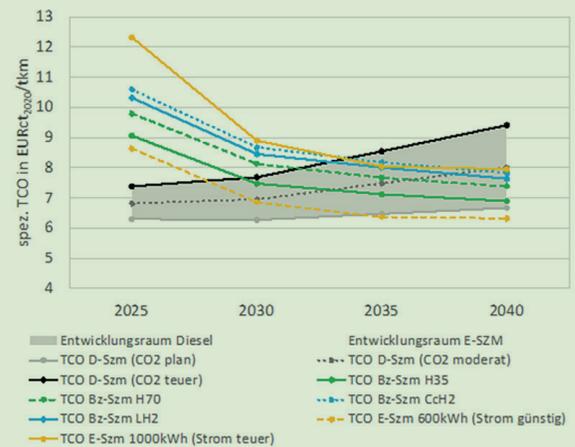


Bild 1.24: Ergebnisse spezifischer TCO-Vergleich unterschiedlich angetriebener Sattelzugmaschinen ohne Mautbefreiung für emissionsfreie Nutzfahrzeuge, ohne Forderung der Investitionskosten und ohne Berücksichtigung von Erlösen der THG-Quotenhandels

### 1.5.6 Arbeitsgruppe „Systeme und Netze“

Wolfgang Köppel, Odey Al-Wedyan, Florentin Glockner, Maximilian Heneka, Christian Hotz, Márton Kopasz, Arvind Menon, Lisa Merz, Jithin Mohan, Fariba Moradipour, Amin Khayatzaadeh Praseeth Prabhakaran, Louis Wayas

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 Biometan oder Wasserstoff, Sektorenkopplung auf Verteilnetzebene und die kommunale Wärmeplanung. Methodisch werden Netz- und Energiesystemsimulationen sowie techno-ökonomische und ökologische Analysen bewertet. Im Folgenden wird das selbstentwickelte Simulationswerkzeug KoSy und die DVGW-Studie H2Net&Logistics beispielhaft vorgestellt.

Für die praxisnahe Modellierung von sektorgekoppelten Energiesystemen wurde in den letzten Jahren der Simulationswerkzeugkasten KoSy entwickelt, mit dem Energiesysteme inklusive Energienetze abgebildet und die Wechselwirkungen sowie Synergien innerhalb des Energiesystems beschrieben werden können (Bild 1.23). Für die dynamischen Simulationen können verschiedene Modelle miteinander gekoppelt werden. KoSy wird z. B. für Transformationsplanungen der kommunalen Wärmeplanung oder für die Analyse von Szenarios eingesetzt, um flexible, bezahlbare und umsetzbare Konzepte unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen aufzustellen. Im ersten Schritt werden verfügbare Daten zu Energieverbräuchen, Energieerzeugung, Energieinfrastrukturen sowie deren erwarteten Entwicklungen in die Modelle eingepflegt. Aus den Simulationen werden dann zeitlich und örtlich aufgelöste Energiemengen für die Strom-, Wärme- und Gasnetzberechnungen bereitgestellt. Im nächsten Schritt werden dann mögliche Netzengpässe ermittelt. Aus den Simulationsergebnissen können dann

Transformationspfade und Entscheidungsgrundlagen abgeleitet werden.

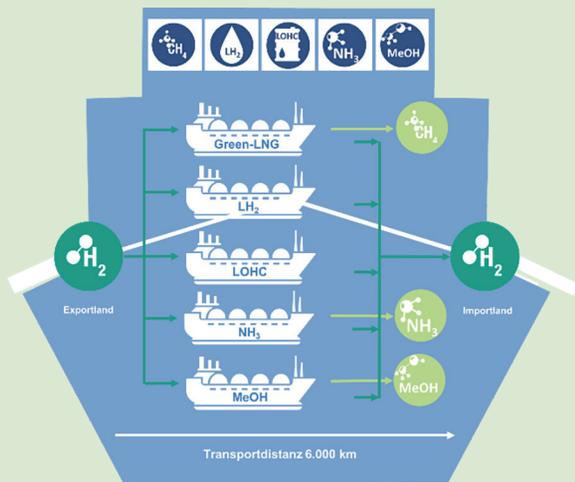
Im Themengebiet Mobilität wurde das DVGW-Vorhaben H2Net&Logistics durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie wurden technische, wirtschaftliche und ökologische Aspekte bei der Versorgung von H<sub>2</sub>-Tankstellen für den straßengebunden Schwerlastverkehr über das Gasnetz analysiert.

Brennstoffzellen-Lkw (FCE-LKW) haben aktuell einen Kostennachteil gegenüber Dieselfahrzeugen. Durch erwartbare Kostendegression entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Lkw, Tankstelle, H<sub>2</sub> Produktion und -Verteilung) wird sich die Positionierung des FCE-Lkw im Vergleich zum Diesel Lkw zukünftig verbessern (Bild 1.24). Gleiches gilt auch für batterieelektrische Lkw. Ohne eine Mautbefreiung für emissionsfreie Nutzfahrzeuge, ohne Förderung der Investitionsmehrkosten und ohne Berücksichtigung der Erlöse aus THG-Quotenhandel ist allerdings ein Diesel-Lkw auch im Jahr 2030 weiterhin wirtschaftlicher als emissionsfreie Alternativen.

Im Projekt wurde auch die H<sub>2</sub>-Bereitstellung für acht verschiedene Optionen analysiert: Hauptaugenmerk lag dabei auf:

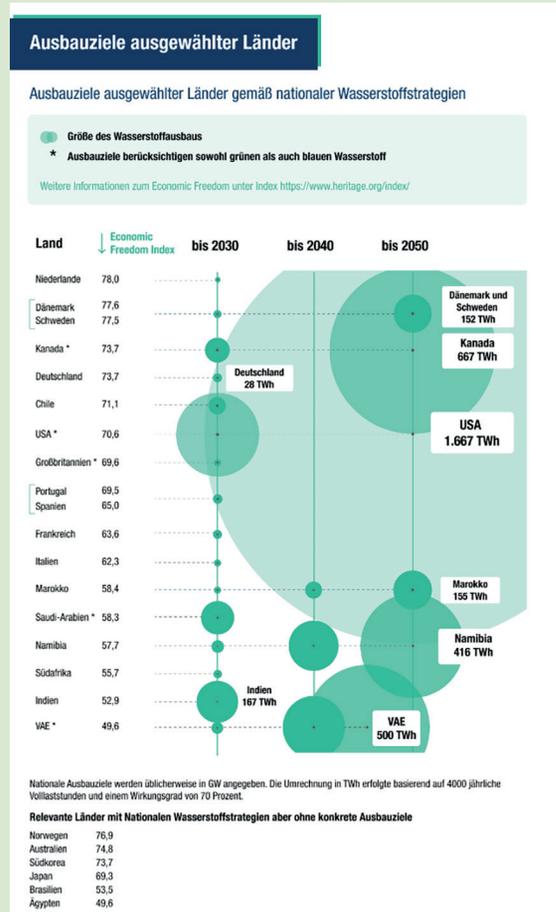
- schiffsbasiertem Import von verflüssigtem Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) aus Kanada
- pipelinebasiertem Import von H<sub>2</sub> aus Marokko
- zentraler und dezentraler H<sub>2</sub>-Produktion in Deutschland
- H<sub>2</sub>-Produktion an der Tankstelle

Die Analysen zeigen, dass der Wasserstoffimport aus Marokko die günstigste Bezugsoption mit Bereitstellungskosten von 7,2 €/kg im Jahr 2025 bzw. 5,3 €/kg im Jahr 2045 darstellt. Das teuerste Versorgungskonzept stellt der LH<sub>2</sub>-Import mit 10,1 €/kg (2025) bzw. 9,0 €/kg (2045) aus Kanada dar. Die heimische Erzeugung liegt dazwischen.



**Bild 1.25:** Übersicht über die in der Veröffentlichung betrachteten Optionen zum schiffsbasierten Import von Wasserstoff

► **Bild 1.26:** Ausbauziele Ausgewählter Länder zur Erzeugung von klimafreundlichem Wasserstoff in den Jahren 2030, 2040 und 2050. Abbildung aus dem 2024 erschienen Factsheet „Wasserstoff – woher, wieviel und wie?“



### 1.5.7 Arbeitsgruppe „Verfahrenstechnik“

Friedemann Mörs, Katharina Bär, Peter Kussin, Christiane Staudt, Christian Müller, Maria Nikolaus, Ruth Schlautmann, Michael Schneider, Johannes Schwarze, Tobias Stegmaier

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), CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Gasreinigung sowie biologische und katalytische Methanisierung. Dabei ist unser 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 einige Forschungsprojekte vorgestellt.

### H<sub>2</sub>-Import in TransHyDE Sys und dem DVGW

Im Rahmen des Verbundes Systemanalyse des Wasserstoffleitprojektes TransHyDE (BMBF) wurden im letzten Jahr verschiedene Optionen für den schiffsbasierten Wasserstoffimport technisch bewertet. Auf Basis einer Literaturstudie wurden die Energiebedarfe zum Import von Wasserstoff in verflüssigter Form, aber auch als H<sub>2</sub>-Derivat (verflüssigtes Methan, Methanol und Ammoniak) oder gespeichert in Liquid Organic Hydrogen Carriern (LOHC) ermittelt (Bild 1.25). Die betrachtete Prozesskette umfasste die Umwandlung von Wasserstoff im Exportland, das Lagern und Verladen im Exportland, den Schifftransport sowie das Verladen, Lagern und Umwandeln im Importland.

Der Vergleich der verschiedenen Importoptionen fand auf Basis des energetischen Ausnutzungsgrades statt. Den höchsten energetischen Ausnutzungsgrad hat die Importoption flüssiger Wasserstoff mit 73 %. Wird auch die direkte Nutzung der Derivate im Importland betrachtet, hat der Import von Ammoniak den höchsten energetischen Ausnutzungsgrad mit 77 %. Bei den kohlenstoffhaltigen Derivaten wurde vor allem bei der direkten Nutzung eine Auswirkung der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung auf den energetischen Ausnutzungsgrad beobachtet.

Es wurde außerdem festgestellt, dass für eine technische Bewertung der Importoptionen nicht alleine die energetische Effizienz entscheidend ist, sondern auch Kriterien wie die vorhandene inländische Infrastruktur, der Status des Schiffstransportes, das TRL der nötigen Prozessschritte oder das Handling der Derivate eine wichtige Rolle spielen. Z. B. sind nicht alle Prozesse zur Rückumwandlung von H<sub>2</sub>-Derivaten zu H<sub>2</sub> großtechnisch verfügbar. So weist das NH<sub>3</sub>-Cracking mit TRL 5-6 ein vergleichsweise niedriges TRL auf. Um einen Beitrag zur Erhöhung des TRL zu leisten, wurde in Kooperation mit dem Lehrstuhl (KIT EBI ceb) begonnen, dieses sehr relevante Themenfeld des NH<sub>3</sub>-Cracking zu erforschen.

Derzeit wird die Studie zudem um den Energieträger Dimethylether (DME) ergänzt.

In der zweiten Hälfte des Jahres 2023 wurde das Thema Wasserstoffimporte in der Kurzstudie „4in40“ vom DVGW fortgeführt und in einem Factsheet wurden H<sub>2</sub>-Potenziale, Ausbauziele verschiedener Länder (Bild 1.26), das TRL der Importoptionen sowie Transport- und Gestehungskosten veröffentlicht. Dabei wurden folgende technologische Hürden identifiziert:

- Ausbau von Terminals in der für Energieimporte erforderlichen Größenordnung
- Erhöhung der Schiffskapazitäten für Derivate und Anlagen zur Umwandlung von Derivaten
- Weltweite CO<sub>2</sub>-Logistik ist für die H<sub>2</sub>-Derivate Methan und Methanol sowie für die Umsetzung von blauem Wasserstoff entscheidend.
- Es müssen Investitionsentscheidungen getroffen werden, um die künftige Nachfrage zu decken. Dazu sind ein angemessener Rechtsrahmen und internationale Vereinbarungen zwischen potentiellen Erzeuger- und Verbraucherländern essentiell.

### H2Mare Verbund PtX-Wind

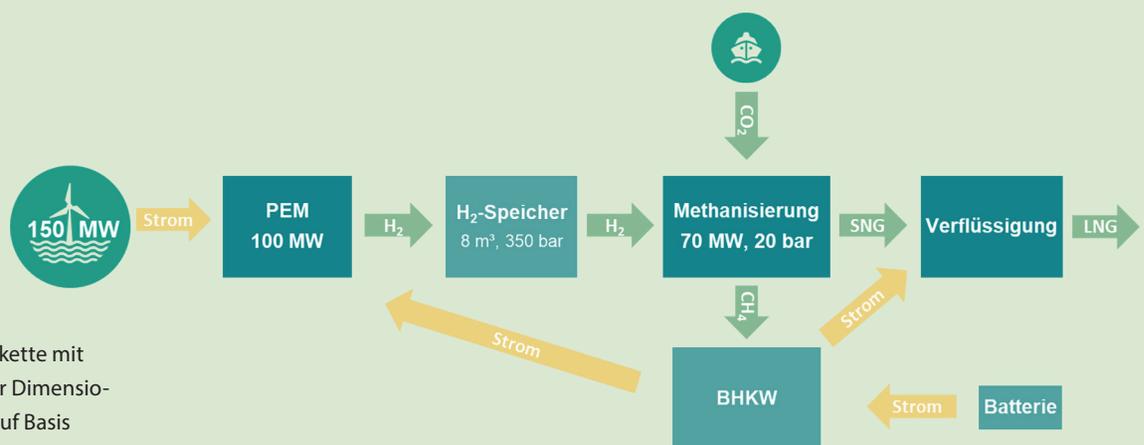
Im Verbundvorhaben „H2Mare PtX-Wind“ werden Lösungen zu offshore Weiterverarbeitung von grünem Wasserstoff in die chemischen Energieträger LNG, Methanol, Fischer-

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.

Im vergangenen Jahr wurden Massen- und Energiebilanzen, Verfahrensfliessbilder und Flussdiagramme für die Offshore-LNG-Erzeugung, zunächst für den stationären Betrieb, erarbeitet und in Form einer Design Basis festgehalten. Um ein passendes Plattform-Design zu entwickeln und eine Kostenschätzung abgeben zu können, muss die Gesamtanlage jedoch für den fluktuierenden Betrieb ausgelegt werden. Die Dimensionierung von Apparaten, Reaktoren, Zwischen- und Produktspeichern erfolgt auf Grundlage eines eigens entwickelten, dynamischen Modells der Prozesskette (siehe vereinfachte Struktur in Bild 1.27). Dieses wurde von der Arbeitsgruppe Systeme & Netze in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik in Modelica aufgebaut.

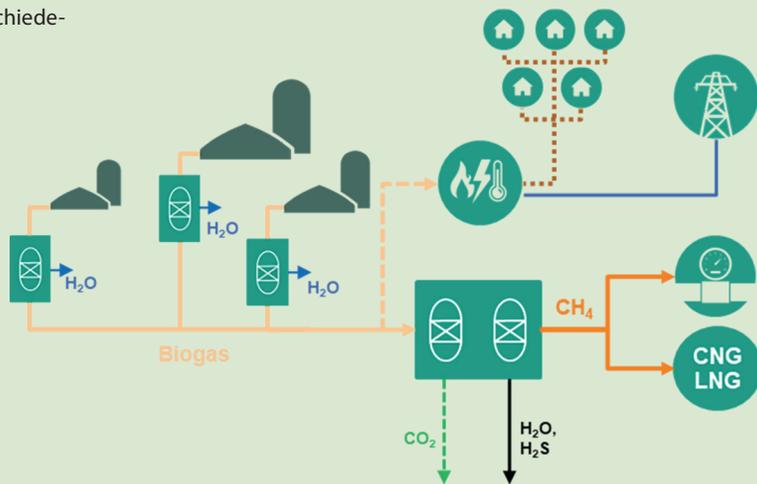
Aufbauend auf bestehenden Modellen konnte die Integration einer Methanverflüssigung und deren dynamisches Verhalten erstmals realistisch abgebildet werden. Im nächsten Schritt werden primär die Kapazitäten der Speicher und der Methanisierung optimiert. Neue Erkenntnisse aus dem Projektkreis zum dynamischen Verhalten der Teilprozesse und zu optimierten Regelungskonzepten fließen weiterhin in das Modell ein.

Für die Demonstration der Prozesskette am EnergyLab 2.0 am Campus Nord des KIT wurden Fundamente für die Anlagen fertiggestellt und weitere Infrastrukturmaßnahmen durchgeführt. Die Gaswäsche mit Ionischen Flüssigkeiten wurde im Rahmen des Projekts probioLNG final (BMBF) als Baugruppe abgenommen und kann in den kommenden Monaten in einen eigens angefertigten Container im EnergyLab 2.0 integriert werden. Die Verflüssigungsanlage mit Stirling-Aggregat wurde getestet und wird ebenfalls im Jahr 2024 ans EnergyLab 2.0 verlegt.



**Bild 1.27:** LNG-Prozesskette mit erster Abschätzung der Dimensionen der Anlagenteile auf Basis der dynamischen Modellierung

**Bild 1.28:** Clusterung von Biogasanlagen mit verschiedenen Nutzungsoptionen



### 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 1.28) auch außerhalb des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG).

Im vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderten Projekt „BGA-Cluster“ werden verschiedene Zukunftsperspektiven der Clusterung von Biogasanlagen untersucht. Die Erkenntnis fließen in einen öffentlich verfügbaren Leitfaden ein, um die schnelle Umsetzung in die Praxis zu fördern. Unter anderem wurde dazu ein Beispiel-Cluster ausgelegt und techno-ökonomisch bewertet. Die Arbeiten haben gezeigt, dass die Clusterung mehrerer Biogasanlagen im Vergleich zu einem alleinigen Netzanschluss die Investitionskosten des einzelnen Biogasanlagenbetreibers halbieren kann. Weiterhin reduzieren sich beim örtlichen Gasnetzbetreiber die Zahl der Einspeisebegehren, da innerhalb eines Clusters viele Biogasanlagen gebündelt werden und somit nur ein Einspeisebegehren gestellt werden muss und entsprechend auch nur eine Einspeisestation errichtet werden muss.

### 1.5.8 Arbeitsgruppe „Materialprüfung“

Andreas Strauß, Sonja Lutz, Jörg Riedl

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

Jedoch werden zunehmend Prüfungen für Wasserstoff und weitere Gase der Energiewende nachgefragt. Meist sind es Fragestellungen zur Eignung von Elastomeren, Flachdichtungswerkstoffen und Schmierstoffen, die sowohl in der Gasinstallation bei geringen Drücken (< 5 bar) als auch in der Gasanwendung mit Drücken bis 100 bar eingesetzt werden. Um sich auf die neuen Anforderungen einzustellen, wurde die Arbeitsgruppe neu strukturiert und erweitert. Neben den bisherigen Prüfbereichen 1. Elastomere und Dichtungen, 2. Hilfsstoffe und 3. Korrosionsschutzsysteme, wurde der Prüfbereich **Gas der Energiewende** neu geschaffen. Für diesen Prüfbereich wurde das Team der Materialprüfung um eine Ingenieur- und eine Technikerstelle erweitert. Unsere neuen Kollegen können sich so losgelöst vom Standardprüfgeschäft ganz auf die neuen Aufgaben fokussieren, die die Energiewende mit sich bringt.

Unsere Zielsetzung ist es, den Kunden eine lösungsorientierte und nachhaltige Vorgehensweise zur Bewertung der Eignung ihrer Werkstoffe zu bieten. Die von uns praktizierte strukturierte Vorgehensweise sieht die folgenden Schritte vor:

1. Überblick verschaffen im Rahmen eines Forschungsprojektes.
2. Definition einer Prüfmethode
3. Veröffentlichung der Prüfmethode als Zertifizierungsprogramm (ZP) der DVGW CERT als Grundlage zur Ergänzung bestehender Basiszertifizierungen
4. Sammeln von Daten
5. Fortschreibung von Normen

Im Rahmen des in 2023 abgeschlossenen DVGW-Forschungsprojektes F&E für H<sub>2</sub> (G202021) wurde das ZP 5101 abgeleitet. Eine große Anzahl danach geprüfter Werkstoffe sind bereits im öffentlich zugänglichen Zertifizierungsverzeichnis „H<sub>2</sub> ready – bis 100%“ der DVGW CERT GmbH gelistet. Auf der Grundlage gesammelter Daten soll in 2024 die EN 549 um ein Amendment zur Bewertung der werkstoffspezifischen H<sub>2</sub>-Permeabilität ergänzt werden.

Im Juli 2023 wurde das DVGW-Forschungsprojekt HyE-KuS (G202208) gestartet, im Rahmen dessen weitere Elastomer-/Kunststoffuntersuchungen durchgeführt werden. Daneben liegt der Fokus auf der Bewertung der H<sub>2</sub>-Eignung von Flachdichtungswerkstoffen, Schmierstoffen und Dichtmitteln.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Bewertung der Beständigkeit von Elastomeren gegenüber rDME durchgeführt. rDME (regenerativ erzeugter Dimethylether) wird als vielversprechender Energieträger aus erneuerbaren Quellen zur Substitution von fossilem Flüssiggas angesehen. Die Untersuchungen sind soweit fortgeschritten, dass bereits ein Amendment zur EN 549 in Vorbereitung ist.

Im Rahmen von Vorträgen, z. B. Wasserstofftag der DVGW CERT und beim Praktikerforum der **gatlwat** sowie in nationalen und internationalen Gremien konnte der Austausch gefördert werden.

Die Vernetzung in Gremien zur Gestaltung und Fortschreibung von Normen und Regelwerken ist von essentieller Bedeutung. In mitarbeitenden und auch leitenden Funktionen sind unsere Mitarbeiter z. B. in DVGW G-TK 2-4 bzw. NA 032-03-02 Bauteile und Hilfsstoffe, DVGW G-TK 1-4 Anlagentechnik, DVGW G-TK 1-10 bzw. NA 032-02-09 AA Außenkorrosion, NA 045-02-09-01 AA Rohrleitungsdichtungen aus Elastomeren, DVGW G-PK-1-0-15 Clearing VerifHy, CEN/TC 208, CEN/TC 181 sowie in der Normungsroadmap H<sub>2</sub> AG 4.3.2 vertreten.

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

- **Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW G 406 (M)** Anforderungen an neue Gasarmaturen in H<sub>2</sub>-Anwendungen für Gastransport, Gasverteilung und Gasinstallation, Januar 2023
- **DIN EN 549 + A1** „Elastomer-Werkstoffe für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten und Gasanlagen“ wurde im Juli 2023 um **Anhang 1** mit optionalen Prüfungen erweitert, so dass DVGW G5406 zurückgezogen werden kann.
- **DVGW-Information GAS/WASSER Nr. 27** Korrosionsschutz – Überblick Merkmale und Prüfmethode von Werks- und Nachumhüllungen; Veröffentlichung der bisher bearbeiteten Prüfungen August 2021, August 2022 und August 2023, das Dokument wird weiter fortgeschrieben

### 1.5.9 Arbeitsgruppe „Brennstofflabor“

Jochen Schütz, Kerstin Kröger, Stephan Seidelt

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

Die Arbeitsgruppe beschäftigte sich 2023 insbesondere mit der Vertiefung der Expertise im Themenkomplex Wasserstoff. Hierzu zählen die vollumfängliche Analytik der Gasbeschaffenheit, die Bestimmung von Gasbegleit- und Spurenstoffen und verschiedene Probenahmemethoden.

Im Bereich Methodenentwicklung arbeitet die Arbeitsgruppe Brennstofflabor fortlaufend an der Etablierung und Weiterentwicklung von Messmethoden und Probenahmeverfahren. So konnte 2023 eine neue Apparatur zur Beprobung von LNG-Tankstellen in die Fertigung überführt und fertiggestellt werden. Damit ist es möglich, Proben von flüssigem LNG für die anschließenden Laboranalysen bereitzustellen. Bisherige Probenahmeverfahren beschränkten sich lediglich auf das gasförmige Boil-off-Gas.

Im Rahmen des Wasserstoff-Leitprojekts Get H<sub>2</sub> TransHyDE (BMBF) waren die Weiterentwicklung des Wasserstofflabors und die Erarbeitung von Analysemethoden die Hauptaufgaben in 2023. Neben der Gasbeschaffenheitsanalytik von Gasproben dient der Messaufbau auch der Bestimmung des Durchbruchverhaltens von Spurenstoffen und Verunreinigungen bei der adsorptiven Wasserstoffreinigung. Hierzu wurde eine im Wasserstofflabor aufgebaute Versuchsanlage mit der bestehenden Analytik gekoppelt.

Innerhalb des Forschungsprojekts RingWaBe (BMDV) lag in 2023 der Fokus hauptsächlich auf der Beschaffung und Inbetriebnahme der Investitionsgüter. In diesem Zusammenhang wurde das Wasserstofflabor u.a. um eine Apparatur zur Vorbereitung von Probenahmezylindern erweitert. Mit dieser ist es möglich, die Zylinder mit Hochvakuum zu reinigen und anschließend mit hochreinem Wasserstoff zur Probenahme vorzubereiten. Darüber hinaus war die Arbeitsgruppe am Entwicklungsprozess einer Probenahmeapparatur zur Beprobung von H<sub>2</sub>-Tankstellen (350 bar und 700 bar) beteiligt, welche in Q2/2024 an das Wasserstofflabor ausgeliefert wird. Zusätzlich wurde eine Probenahmeapparatur entwickelt und gebaut, um Probenahmen bei Drücken < 100 bar durchführen zu können. Dies soll vornehmlich an H<sub>2</sub>-Netzen, Elektrolyseuren oder Industrieanlagen geschehen.

Neben der Gasbeschaffenheit, Analytik und Probenahme, beschäftigte sich die Arbeitsgruppe auch weiterhin mit sicherheitstechnischen Aspekten bei der netzgebundenen Gasverteilung in der öffentlichen Versorgung. Vor allem sind

hierbei die Themenkomplexe der Leckagedetektion und Odorierung von Wasserstoff zu nennen. Darüber hinaus rückt der Fokus immer stärker auf die Vermeidung von Methanemissionen. Hierzu wurden im Rahmen der betrieblichen Forschung, verschiedene DVGW-Forschungsprojekte bearbeitet und Vorarbeit für neue Forschungsprojekte geleistet.

Das DVGW-Forschungsvorhaben „UmSiAG – Umwelt- und sicherheitsrelevante Aspekte in der Gasverteilung – Bewertung der Überwachungs-, Überprüfungs- und Reparaturintervalle zur Umsetzung der EU-Verordnung zur Verringerung der Methanemissionen im Energiesektor und Vorschläge für neue Überprüfungs- und Reparaturintervalle im Arbeitsblatt G 465-1 (A) und Merkblatt G 465-3 (M)“ wurde zum 01.09.2023 gestartet. Projektziel ist es, eine Zusammenfassung aller DVGW relevanten Forschungsvorhaben, Studien und Regelwerksbestandteile zum Themenbereich „Leak Detection and Repair“ an Rohrleitungen < 16 bar zu erstellen. Dabei sollen die Aspekte Reduzierung von Methanemissionen und Sicherheit des Gasnetzes beachtet werden.

Darüber hinaus wurden folgende DVGW-Forschungsprojekte in 2023 erfolgreich abgeschlossen:

- „H<sub>2</sub>-OdoSen – Voruntersuchungen zur sensorbasierten Ergänzung des Sicherheitskonzepts für die Gasversorgung mit Wasserstoff“
- „H<sub>2</sub>-Odor – Wasserstoff-Odorierung als ein Sicherheitselement bei der Versorgung der Allgemeinheit (Phase 1)“

## 1.6 Öffentlichkeitsarbeit

### 1.6.1 Veranstaltungen

#### Gaskursus

Vom 27. bis 31. März 2023 fand der Gaskursus wieder als Präsenzveranstaltung in Karlsruhe statt. Insgesamt 54 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.

#### 64. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches

Mit großzügiger Unterstützung durch die Meter-Q Solutions GmbH fand vom 20. bis 22. September 2023 der 64. Erfahrungsaustausch im Parkhotel am Taunus in Oberursel statt. An den Fachbeiträgen zur Rolle von Gas bei der Energiewende und aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten nahmen insgesamt 64 interessierte Fachleute teil.

Im Anschluss an die Vorträge wurde am Nachmittag das Freilichtmuseum Hessenpark besichtigt. Bei dem gemeinsamen Abendessen im Restaurant Johannisberg, Bad Nauheim wurde der fachliche Austausch fortgesetzt.

### 1.6.2 Veröffentlichungen im Jahr 2023 – EBI ceb

#### Zeitschriftenaufsatz

- Bär, K.; Mörs, F.: Große Potentiale für LKW und Schiffe. DLG-Mitteilungen 11/2023.
- Dammann, M.; Mancini, M.; Kolb, T.; Weber, R.: Thermal radiation at high-temperature and high-pressure conditions. Comparison of models for design and scale-up of entrained flow gasification processes. *Thermal Science and Engineering Progress* 6 (3), S. 101772. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101772.
- Graf, D.; Waßmuth, J.; Rauch, R.: Co-Hydroprocessing of Fossil Middle Distillate and Bio-Derived Durene-Rich Heavy Ends under Hydrotreating Conditions. *Reactions* 4 (3), S. 531–551. DOI: 10.3390/reactions4030032.
- Graf, D.; Neuner, P.; Rauch, R.: Standard-Compliant Gasoline by Upgrading a DTG-Based Fuel through Hydroprocessing the Heavy-Ends and Blending of Oxygenates. *Fuels* 4 (2), S. 156–173. DOI: 10.3390/fuels4020010.
- Graf, F.; Isik, V.; Heneka, M.; Köppel, W.; Kolb, T.; Fleer, A.-C.; Verbücheln, R. W.: Aktuelle Fragestellungen beim leitungsgebundenen Transport von Wasserstoff. *Chemie Ingenieur Technik* 96 (1-2), S. 74–85. DOI: 10.1002/cite.202300106.
- Hotz, C.; Haas, M.; Wachter, S.; Fleck, S.; Kolb, T.: Experimental investigation on entrainment in two-phase free jets. *Fuel* 335 (21–23), S. 126912. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126912.
- Köppel, W.; Wietschel, M.; Gnann, T.; Fleiter, T.; Lux, B.; Manz, P.; Rehfeldt, M., Speth, D., Steinbach, J., Pfluger, B.: Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem – eine systemische Analyse. *energie | wasser-praxis* (1), S. 51–57.
- Kröger, K.; Schütz, J.; Graf, F.: Ergebnisse des DVGW-Forschungsvorhabens EvaNeMeL. *energie | wasser-praxis* (3), S. 24–29.
- Kussin, P.; Kröger, K.; Schütz, J.; Mörs, F.; Graf, F.: Entfernung von geruchsrelevanten Begleitstoffen aus Biogas. *energie | wasser-praxis* (2), S. 52–57.
- Poppenborg, R.; Chlosta, M.; Ruf, J.; Hotz, C.; Düpmeier, C.; Kolb, T.; Hagemeyer, V.: Energy Hub Gas. A Modular Setup for the Evaluation of Local Flexibility and Renewable Energy Carriers Provision. *Energies* 16 (6), S. 2720. DOI: 10.3390/en16062720.
- Rauch, R.; Graf, F.; et.al.: Ergebnisbericht reFuels – Kraftstoffe neu denken. Hg. v. O. Toedter. *Karlsruher Institut für Technologie*.
- Wayas, L.; Köppel, W.; Graf, F.: Generische Gasnetzmodelle - Methodik, Vorteile und Anwendungsbeispiele. *gwf - Gas+Energie* (08/09).
- Zhang, F.; Wachter, S.; Zirwes, T.; Jakobs, T.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Kolb, T.; Stapf, D.: Effect of nozzle upscaling on coaxial, gas-assisted atomization. In: *Physics of Fluids* 35 (4), S. 43302. DOI: 10.1063/5.0141156.

#### Dissertationen

- Mörs, F.: Hydrodynamik in Blasensäulen – Entwicklung von integralen und lokalen Messverfahren und einem wohl definierten Experiment. *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. 2023. DOI: 10.5445/IR/1000165191
- Neuner, P.: Hydroprocessing von synthetischen Wachsen zur Schmiermittelproduktion. *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. 2023. DOI: 10.5445/IR/1000161117
- Wachter, S.: Scale-up and design of gas-assisted atomizers. *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. 2023. DOI: 10.5445/IR/1000159585

**Beiträge/Vorträge**

- Asbahr, W.; Rauch, R.: New Reactor Concept for Sorption-Enhanced Fischer-Tropsch Synthesis. Waste2H2 Final Conference. Polytechnic Institute of Portalegre, Portalegre, Portugal, 09.-10.11.2023.
- Asbahr, W.; Rauch, R.: New Reactor Concept for Sorption-Enhanced Fischer-Tropsch Synthesis. Waste2H2 Final Conference. Portalegre, Portugal, 09.11.2023.
- Bär, K.: Clusterung von Biogasanlagen: Vorstellung der aktuellen Forschungsergebnisse. KTBL/FNR-Kongress „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Bonn, 12.09.2023.
- Bär, K.: Clustering von Biogasanlagen: Ergebnisse zur technischen Umsetzung und Kosten aus Modellregionen. Biogas Convention, Nürnberg, 13.12.2023.
- Fleck, S.; Haas, M.; Santo, U.; Jakobs, T.; Kolb, T.: High Pressure Entrained Flow Gasification - a Key Enabling Technology in Circular Economy. Helmholtz Energy Conference 2023. Helmholtz Metadata Collaboration. Koblenz, 12.06.2023.
- Graefe, P.; Asbahr, W.; Rauch, R.: Three-Phase CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch Synthesis - In-Line Quantification of Water by Tunable Diode Laser Spectroscopy. POSTER. 14<sup>th</sup> European Congress of Chemical Engineering. Berlin, 17.-21.09.2023.
- Graefe, P.; Honold, V. B.; Rauch, R.: Effects of Co-Feeding CO on Catalyst Activity and Selectivity in Three-Phase CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch Synthesis. Waste2H2 Final Conference. Portalegre, Portugal, 09.11.2023.
- Jakobs, T.; Wachter, S.; Richter, J.; Fleck, S.; Kolb, T.: Burner Development for Entrained Flow Gasification - Mass Flow Scaling of Gas Assisted Burner Nozzles. Jahrestreffen DECHEMA, FG Hochtemperaturtechnik. Karlsruhe, KIT, EBI, 28.03.2023.
- Jakobs, T.; Wachter, S.; Fleck, S.; Kolb, T.: Spray Investigations for Nozzle Design. Jahrestreffen der DECHEMA Fachgruppen Aerosoltechnik (AT), Gasreinigung (GAS), Mehrphasenströmung (MPH) und Partikelmesstechnik (PMT). Paderborn, 28.03.-30.03.2023.
- Jakobs, T.; Haas, M.; Fleck, S.; Santo, U.; Kolb, T.: Burner Development and Optimization for High Pressure Entrained Flow Gasifiers. 11<sup>th</sup> International Freiberg Conference. TU Bergakademie Freiberg. Rotterdam, NL, 24.09.2023.
- Kolb, T.: Industry without natural gas - (how) is it possible? 6<sup>th</sup> Nuremberg Workshop on Methanation and 2<sup>nd</sup> Generation Fuels. Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg. Nürnberg, 01.06.2023.
- Mörs, F.: Modul 3 – Rohrleitungen und Anlagen für wasserstoffhaltige Gase und H<sub>2</sub>. DVGW-Zertifikatslehrgang “Methanisierung”, 23.02.2023.
- Mörs, F.: Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff und SNG. DVGW Seminarreihe Wasserstoff “Erzeugung und Einspeisung von Wasserstoff und SNG”, 14.03.2023 und 26.10.2023.
- Mörs, F.: Schiffsgebundener Wasserstofftransport – Technische Bewertung von Technologien zum Import von H<sub>2</sub>. 64. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches, Oberursel, 20.-22.09.2023.
- Poppenborg, R.; Beisswanger, K.; Hotz, C.; Förderer, K.; Kolb, T.; Hagenmeyer, V.: Dynamic Mapping for Evolutionary Algorithm Based Optimization of Energy Hub Gas Scheduling. International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). Ontario Tech University. Ontario, Canada, 13.08.2023.
- Poppenborg, R.; Beisswanger, K.; Hotz, C.; Förderer, K.; Kolb, T.; Hagenmeyer, V.: Dynamic Mapping for Evolutionary Algorithm Based Optimization of Energy Hub Gas Scheduling. 11<sup>th</sup> International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). Ontario, Kanada, 13.-15.08.2023.
- Sauerschell, S.; Bajohr, S.; Kolb, T.: Methanation Pilot Plant with a Slurry Bubble Column Reactor: Setup and First Experimental Results. 6<sup>th</sup> Nuremberg Workshop on Methanation and 2<sup>nd</sup> Generation Fuels. Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 02.06.2023.
- Staudt, C.: Wie kommt der Wasserstoff ins Land? DVGW online-Event “H<sub>2</sub> Lunch & Learn”, 31.05.2023
- Staudt, C.: Schiffsgebundener Wasserstofftransport – Technische Bewertung von Technologien zum Import von H<sub>2</sub>. TransHyDE Stammtisch, 06.10.2023.
- Walker, S.; Kolb, T.: Reaction kinetics for pressurized gasification of high-temperature biomass char with steam and mixtures of steam with CO<sub>2</sub>. 4<sup>th</sup> International Workshop on Oxy-Fuel Combustion. Collaborative Research Center CRC 129 „Oxyflame“ in Cooperation with STEMS-CNR. Neapel, Italien, 22.03.2023.
- Wayas, L.; Köppel, W.; Jakob, J.; Koralewicz, M.; Kerzel, M.; Zdrallek, M.; Bauhaus, B.: Economic and Technical Benefits of Integrated Power and Gas Grid Planning in Distribution Grids. 27<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED). Rom, Italien, 12.-15.06.2023.

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

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

### 2.1 Lehre und Forschung

Im Jahr 2023 konzentrierte sich der Institutsteil Verbrennungstechnik auf Forschungsthemen rund um die flexible Bereitstellung von Energie und arbeitete dafür an bereits etablierten Forschungsgebieten sowie an neuen Themen. Eine Vielzahl von Untersuchungen wurden dabei durchgeführt, darunter zur Energiespeicherung und -umwandlung, zur Rußbildung, zur Verbrennungstechnik in stationären und Flugzeuggasturbinen sowie für die grundlegende Beschreibung von Verbrennungsvorgängen durch numerische Simulation.

Auch der ehemalige Leiter Prof. Bockhorn war an einigen dieser Untersuchungen beteiligt.

Der allgemeine Forschungsschwerpunkt des Institutsteils ist auf die Notwendigkeit des weitgehenden Verzichts kohlenstoffbasierter Energieträger, bzw. auf den Einsatz kohlenstoffneutraler Energieträger ausgerichtet. Bei Ersteren konzentriert sich die Forschung auf alternative Energieträger wie Metalle, Schwefel, Wasserstoff und Wasserstoffgemische und bei Letzteren auf kohlenstoffhaltige Prozessgase vor folgendem Hintergrund:

- Im Hinblick auf die Sicherstellung der Energieversorgung wird die Verbrennung auch weiterhin in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung eine wichtige Rolle spielen, insbesondere in Bezug auf erneuerbare Energien und alternative Kraftstoffe, Energiespeicherung und effiziente Nutzung, Bereitstellung und Verteilung. Um erneuerbare Energien trotz schwankender Verfügbarkeit nutzen zu können, sind eine schnelle und präzise Steuerung von Verbrennungsprozessen sowie eine intelligente Vernetzung notwendig.
- Alternative und erneuerbare Energiequellen werden weiterhin in Produktionsprozesse integriert und haben damit erhebliche Auswirkungen auf die Qualitätssicherung der Produkte. Folglich müssen die Anforderungen an die Energieeffizienz im Herstellungsprozess und die präzise Steuerung aller beteiligten Teilprozesse erhöht werden.
- Die aktuellen Fragestellungen erfordern eine Betrachtung der Gesamtsystemtechnik, wodurch die Bedeutung der interdisziplinären Zusammenarbeit und der Verbundforschung, insbesondere mit den Werkstoffwissenschaften, zunimmt. Für die exakte Modellierung und numerische Simulation komplexer und multiskaliger Prozesse sind sowohl experimentelle als auch numerische Methoden von entscheidender Bedeutung, wobei die zunehmende Rechenleistung die immer genauere Modellierung ermöglicht.

Aufgrund dieser Überlegungen verfolgt der Institutsteil Verbrennungstechnik folgende Forschungsschwerpunkte:

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

Im Bereich der Lehre wurden überwiegend Veranstaltungen in den klassischen Bereichen der Verbrennungstechnik, aber auch weitergehende Lehrveranstaltungen in Grund- und Vertiefungsfächern der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik (CIW/VT) angeboten. Das Praktikum „Numerik im Ingenieurwesen“ sowie die Vorlesungen „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien“, „Messtechnik in der Thermofluidynamik“ und „Energietechnik“ können hier erwähnt werden. Neben diesen besonders hervorgehobenen Veranstaltungen waren wieder viele Studierende während ihres Studiums auch an den Forschungsaktivitäten des Insti-

tutsteils beteiligt. Als Ergebnis konnten im Jahr 2023 vier Bachelor- und fünf Masterarbeiten abgeschlossen werden.

## 2.2 Laufende Forschungsarbeiten im Institutsteil Verbrennungstechnik

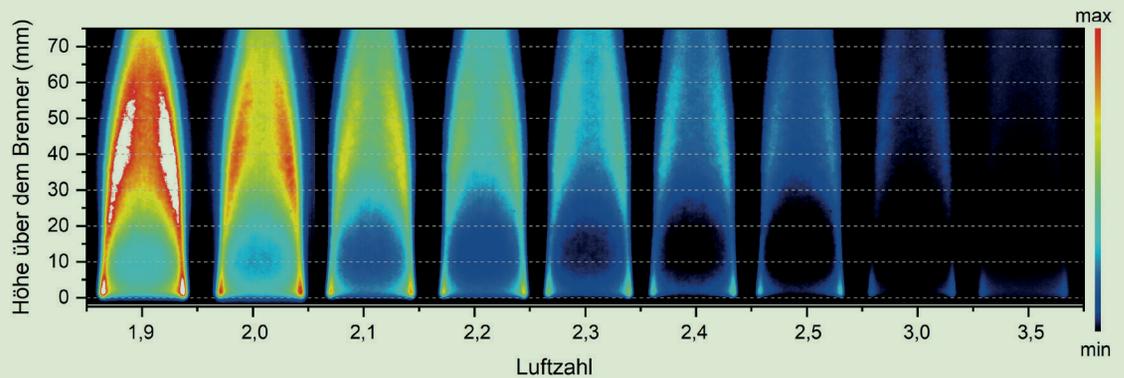
Die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Verbrennungstechnik konzentriert sich auf Problemstellungen, die sich im Zusammenhang mit der für die Speicherung und Bereitstellung von Energie aus nachwachsenden und fossilen Rohstoffen ergeben, auf eine Reduktion der Entstehung von Schadstoffen bei der Verbrennung 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 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. Die folgenden Projektbeschreibungen geben dazu einen kurzen Einblick in aktuelle Forschungsaktivitäten.

In einem von der Friedrich und Elisabeth Boysen-Stiftung geförderten Projekt wird das Ziel verfolgt, den besonderen Herausforderungen einer vorgemischten Wasserstoff-Luft-Verbrennung (hohe Brenngeschwindigkeiten, kurze Reaktionszonen, unter bestimmten Bedingungen auftretende, thermo-diffusive Instabilitäten) durch eine intelligente Strömungsführung zu begegnen. Idee ist es, die Reaktanten durch eine Rückführung von gekühltem Abgas (AGR) zu verdünnen, und so die Flammenstabilität zu erhöhen. Dazu wurde am EBI-VBT ein modularer Modellbrenner entwickelt.

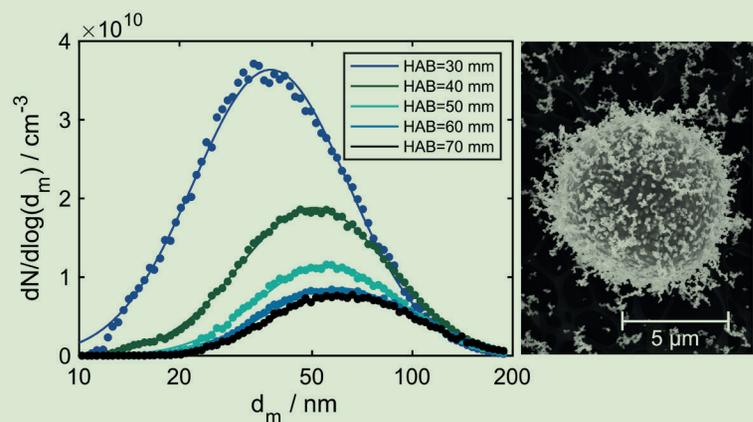
Im laufenden Projekt wurde bisher das nicht-reaktive, turbulente Strömungsfeld experimentell mittels PIV (*Particle Image Velocimetry*) parametrisch untersucht und mit numerischen Berechnungen validiert. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung und zeigen, dass das realisierte Düsenkonzept zu den erwarteten Geschwindigkeitsprofilen am Austritt führt. Weiterhin wurden für ausgewählte reaktive Fälle die Geschwindigkeitsfelder mittels PIV bestimmt sowie OH\*-Chemilumineszenzaufnahmen der Flammen angefertigt (siehe Bild 2.1). Diese Untersuchungen waren zunächst auf reine Wasserstoff-Luft-Verbrennung beschränkt. Im nächsten Schritt folgt nun die reaktive Untersuchung mit AGR und die parametrische Untersuchung der Flamme hinsichtlich Vormischung, Rezirkulationsrate und Verbrennungsstufung.

Eisen als reaktives Metall hat enormes Potenzial für die Energiewende. Im Forschungsprojekt „Clean Circles – Eisen als Energieträger einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft“ wird an verschiedenen Forschungsstandorten in Deutschland interdisziplinär erforscht, wie das Metall zusammen mit seinen Oxiden in einem Kreislauf als kohlenstofffreier chemi-

**Bild 2.1:** Bestimmung der Reaktionsfront durch Detektion der OH\*-Chemilumineszenz von H<sub>2</sub>-Luft-Flammen



**Bild 2.2:** Links: Nanopartikelgrößenverteilungen entlang der Flammenachse, die mithilfe einer Aerosolsonde und differentieller Mobilitätsanalyse bestimmt wurden. Rechts: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines mikrometergroßen Eisenpartikels und einer Vielzahl von Nanopartikeln, die es umgeben bzw. an seiner Oberfläche haften, entstanden nach thermophoretischer Probenahme

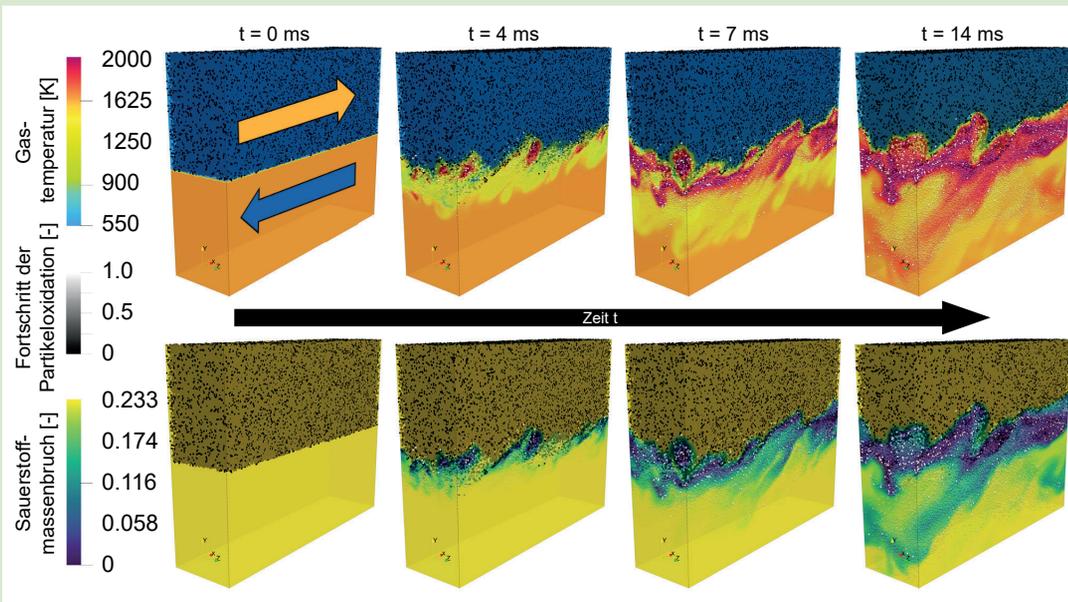


scher Energieträger zur Speicherung von Wind- und Sonnenenergie genutzt werden kann. Mit regenerativ erzeugtem Strom wird Eisenoxid reduziert (Einspeicherung). Örtlich und zeitlich davon getrennt wird das Eisen unter Energiefreisetzung zur Stromerzeugung oxidiert (Auspeicherung). Dadurch können große Mengen an erneuerbarer Energie CO<sub>2</sub>-frei gespeichert, transportiert und bereitgestellt werden – eine zentrale Herausforderung der Energiewende, die bislang noch nicht gelöst ist.

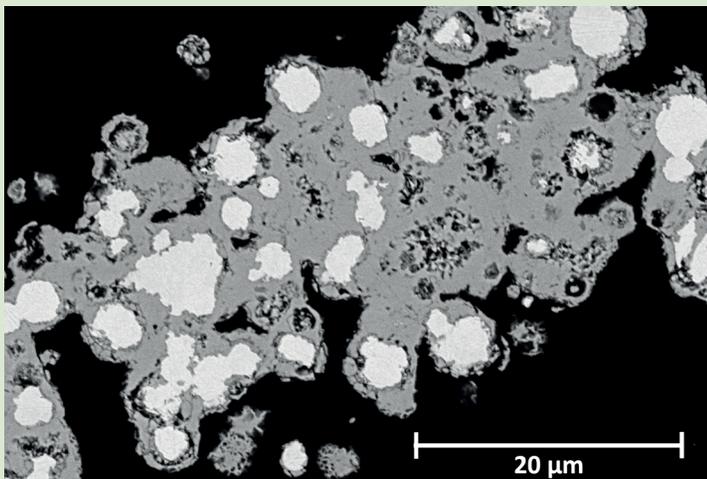
Unter der Leitung von Professor Trimis wird am Institutsteil Verbrennungstechnik die thermochemische Hochtemperaturoxidation in laminaren Eisenstaubflammen experimentell untersucht. Dazu wurde ein Eisenstaubbrenner vom Typ Bunsen entwickelt, mit dem grundlegende Phänomene und Kenngrößen der Eisenstaubverbrennung untersucht werden können. In zahlreichen Grundlagenexperimenten wurden die Flammenstabilität, die laminare Flammgeschwindigkeit, die orts aufgelösten Partikelgrößenverteilungen sowie die Oxidationsstufen der Eisenpartikel in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen analysiert. Darüber hinaus wurde untersucht, ob sich bei der Verbrennung von mikrometergroßen Eisenpartikelensembles Nanoteilchen bilden. Deren Bildung ist ungewollt und sollte vermieden werden, da sie die Masse der reduzierbaren, mikrometergroßen Eisenoxidpartikel, die im Kreislauf geführt werden sollen, stetig verringern kann. **Bild 2.2** zeigt, dass sich der Median der Nanopartikel-

größenverteilung mit zunehmender Höhe über dem Brenner (HAB) zu größeren Werten verschiebt, während die Anzahlkonzentration abnimmt. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Volumenkonzentration der sich bildenden Nanoteilchen durch Verringerung des Sauerstoffgehalts der Verbrennungsluft minimiert werden kann.

Die numerischen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Eisenstaubverbrennung werden von Professor Stein innerhalb seiner Arbeitsgruppe Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme geleitet. Hierzu wurde eine Direkte Numerische Simulation der Trägerphase (Carrier-phase DNS, CP-DNS) von reagierenden Eisenpartikelstäuben in einer turbulenten Mischungsschicht durchgeführt. Die Untersuchung dient dazu, die grundlegenden physikalischen und thermochemischen Vorgänge und Interaktionen zwischen Eisenpartikeln und Gasphasenströmung besser zu verstehen, die am Brenneinlass von industriellen Eisenstaubbrennern stattfinden können. **Bild 2.3** zeigt das dreidimensionale Berechnungsgebiet für die Simulation beispielhaft anhand der Gastemperatur, dem Sauerstoffmassenbruch und dem Partikelensemble zu verschiedenen errechneten Zeitpunkten. Der obere kalte Luftstrom transportiert die mikrometergroßen Eisenpartikel entgegengesetzt zum unteren heißen Luftstrom. Mit fortschreitender Zeit findet die turbulente Durchmischung der beiden Ströme statt, wobei die Partikel sich im unteren Strom aufheizen und dort oxidieren. Die Simulationsergebnisse zeig-



**Bild 2.3:** Simulationsergebnisse des zeitlichen Verlaufes der Oxidation von Eisenpartikeln in einer dreidimensionalen turbulenten Mischungsschicht mittels der CP-DNS-Methode. Dargestellt ist die Temperatur (oben) und der Massenbruch des Sauerstoffes (unten) in der Gasphase. Die Eisenpartikel sind farblich nach ihrem Oxidationsfortschritt dargestellt (schwarz: vor der Oxidation, weiß: nach der Oxidation)



**Bild 2.4:** Rasterelektronenmikroskopische (REM-)Aufnahme einer porösen Eisen(oxid)matrix nach Oxidation mit Wasserdampf bei 500 °C. Die weißen Bereiche stellen elementares Eisen dar, während die grauen Bereiche die oxidische Phase repräsentieren

gen, dass die Zündung der Eisenpartikel in hohem Maße vom Wärme- und Stofftransport zwischen Partikeln und Gas, spezifischen Partikeleigenschaften (z. B. Partikeldurchmesser), der Gasphasenumgebung (z.B. Sauerstoffkonzentration) und der Partikelbeladung und -clusterbildung abhängen.

In einem von der *Academy for Responsible Research, Teaching, and Innovation* (ARRTI) des KIT geförderten Forschungsvorhaben, untersuchen die ARRTI-Fellows Dr.-Ing. Björn Stelzner und Dr.-Ing. Fabian Hagen, inwieweit die Oxidation von Eisen mit Wasserdampf ( $3 \text{ Fe} + 4 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{ H}_2$ ) eine nachhaltige Methode zur Wasserstoffherzeugung darstellen kann. Durch die Reduktion der entstehenden Eisenoxide mit Wasserstoff im Anschluss an den Produktionsprozess wird ein zyklischer Prozess ermöglicht. Im Rahmen dieses Projekts wird ein *Loop-Reaktor* mit hoher Zyklenstabilität entwickelt, der aus einer maßgeschneiderten Eisenmatrix besteht. Dieser Reaktor ermöglicht eine dezentrale, CO<sub>2</sub>-freie und kosten-

günstige Wasserstoffproduktion. **Bild 2.4** zeigt exemplarisch eine elektronenmikroskopische Aufnahme von einem Ausschnitt der porösen Eisen(oxid)matrix, die sich bei der Oxidation mit Wasserstoff bei 500 °C bildet.

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 <https://vbt.ebi.kit.edu> herstellen lassen.

### 2.3 Abgeschlossene Promotionen

Im Jahr 2023 wurden am Institutsteil Verbrennungstechnik fünf Dissertation abgeschlossen. Einen Überblick über die zugehörigen Forschungsthemen geben die im Folgenden aufgeführten kurzen Zusammenfassungen der Arbeiten:

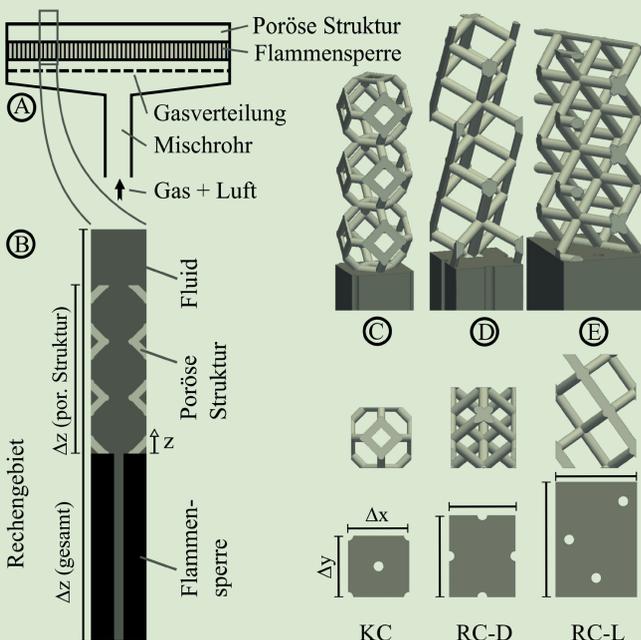
**Christoph Wieland:** Numerische Simulationen in der Optimierung von Porenbrenneranwendungen.  
(Prof. Dr. D. Trimis, Prof. Dr. D. Stapf)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mittels Modellierung und numerischer Simulation zwei extreme, diametral entgegengesetzte Modi der vorgemischten Verbrennung in Porenbrennern im Kontext realer technischer Anwendungen untersucht, um ein tieferes Verständnis über die Komplexität der wechselwirkenden Prozesse und über die Grenzen der technischen Anwendung zu erlangen.

Zum einen wurde am praktischen Beispiel einer Schwachgasverbrennung die vorgemischte Verbrennung stark vorgewärmter Edukte in einem ausgedehnten, volumetrischen porösen Medium mit möglichst geringer Wärmeauskopplung aus der Verbrennungszone analysiert. Anhand eines konkreten Forschungsprojekts wurden für ein Biogas und ein wasserstoffhaltiges Restgas die wesentlichen verbrennungstechnischen Einflussparameter bestimmt, die zur Einbindung einer Schwachgasverbrennung in ein komplexes Prozesskonzept nötig sind. Hierfür wurde in einer Betrachtung des thermodynamischen Gleichgewichts eine Evaluation der Betriebsparameter durchgeführt und anschließend unter Verwendung eines detaillierten chemischen Reaktionsmechanismus eine quasi-zweidimensionale Simulation der Verbrennung im porösen Medium, bei der die effektive Flammgeschwindigkeit als charakteristischer Parameter ermittelt wurde. In einem experimentellen Versuchsaufbau wurden die numerisch ermittelten Werte der effektiven Brenngeschwindigkeit validiert. Aus den Erkenntnissen zu möglichen Betriebsparametern und Grenzen der Technologie wurde für das konkrete Anwendungsbeispiel die Gestaltung eines Brennersystems abgeleitet (Bild 2.5).

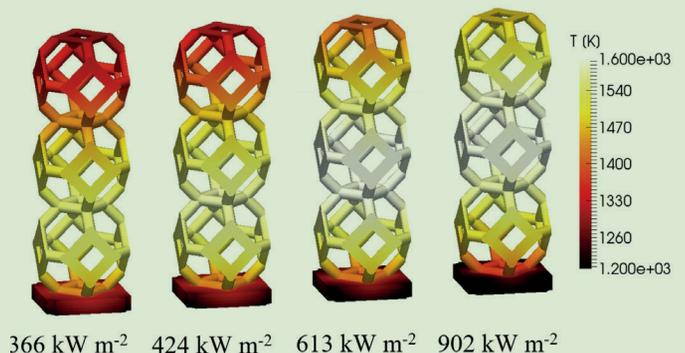
Am Beispiel eines Strahlungs-Porenbrenners wurde das komplexe Wechselspiel von Phänomenen bei der vorgemischten Verbrennung eines konventionellen Brennstoffs in einem dünn-schichtigen porösen Medium unter starker Wärmeauskopplung durch Strahlung aus der Verbrennungszone untersucht. In dreidimensionalen Simulationen wurden dabei für die Gasphase die physikalischen Phänomene von Wärme- und Stofftransport, sowie chemischer Reaktion aufgelöst. Die Wärmeleitung in der Feststoffphase wurde durch konjugierten Wärmeübergang und Festkörperstrahlung mit der Gasphase gekoppelt. Für die betrachteten porösen Strahlungskörper und Betriebsbedingungen ergaben sich axial stratifizierte Temperaturverteilungen, aus den netto emittierten Strahlungsflüssen wurde jeweils eine Strahlungseffizienz und eine effektive Strahlungstemperatur abgeleitet. Es konnte gezeigt werden, dass das Strahlungsspektrum der effektiven Strahlungstemperatur dem Strahlungsspektrum des mit stratifizierter Temperaturverteilung emittierenden porösen Körpers entsprach. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die axiale Position dieser effektiven Strahlungstemperatur auf dem Temperaturprofil des Feststoffs einen leistungsunabhängigen, strukturspezifischen Parameter darstellte (Bild 2.6). In der Analyse der Phasengrenzfläche konnten spezifische Oberfläche und Wärme-flüsse mit der Geometrie des Strahlungskörpers verknüpft werden, hieraus wurden Adaptionen für die Gestaltung einer optimierten Geometrie abgeleitet, die insbesondere das Bereitstellen einer großen Wärmeaustauschfläche, sowie die Vermeidung von Verschattungseffekten betrafen.

**Thomas Christou:** Experimental Investigation of the Pre-filming Airblast Atomization Process under Periodically Oscillating Airflows.



◀ Bild 2.5: Schematischer Aufbau eines Zweischicht-Porenbrenners (A) mit dem Ausschnitt des Rechengebiets (B), sowie dreidimensionale Darstellung der betrachteten Strukturen (C-E) mit getrennter axialer Projektion von Porenkörper und Flammensperre

▼ Bild 2.6: 3D-Ansicht der Feststofftemperaturfelder in der KC-Konfiguration für die vier simulierten flächenspezifischen thermischen Leistungsstufen



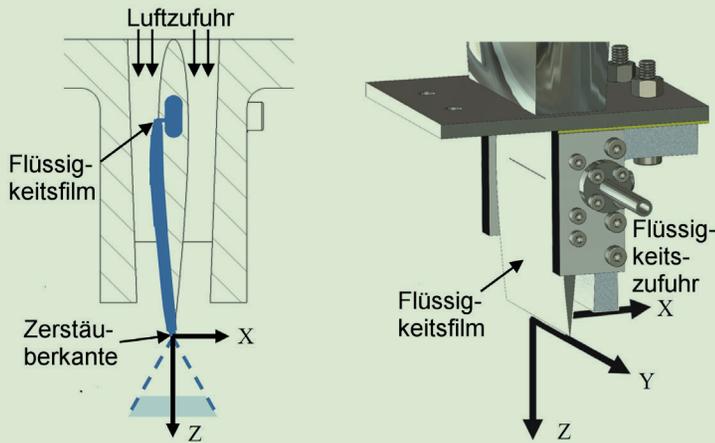


Bild 2.7: Schematische Darstellung des Airblastzerstäubermodells

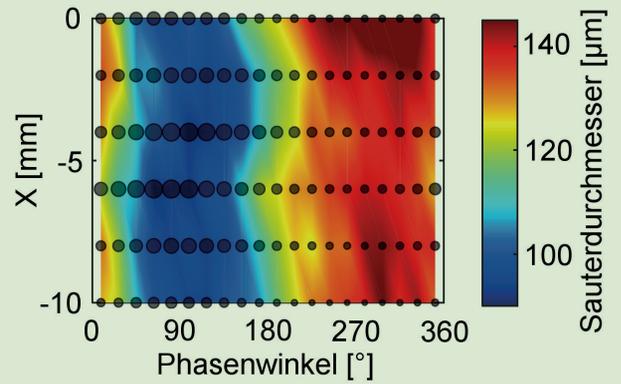


Bild 2.8: Periodische Oszillation des Sauterdurchmessers entlang der radialen Richtung bei  $Z = 40 \text{ mm}$

(Prof. Dr. N. Zarzalis, Prof. Dr. T. Sattelmayer)

Die Luftgeschwindigkeit im Brennkammereintritt eines Flugzeugtriebwerks ist anfällig für Störungen im Rahmen von thermoakustischen Instabilitäten. In den meisten modernen Flugzeugtriebwerken werden Airblast-Zerstäuber eingesetzt, um den flüssigen Brennstoff in einen Sprühnebel aus Tröpfchen zu zerstäuben. Der Zerstäubungsprozess wird durch unkontrollierte Instabilitäten der Eintrittsluftgeschwindigkeit beeinträchtigt, da das Funktionsprinzip dieses Typs von Zerstäuber auf einer hohen Relativgeschwindigkeit zwischen der Luft und dem flüssigen Brennstoff basiert. Die Zerstäubungsqualität wiederum hat einen direkten Einfluss auf kritische Betriebsparameter wie das Luft-Brennstoff-Verhältnis in der Brennkammer, die Flammenstabilitätsgrenzen, die Verbrennungseffizienz sowie das Emissionsverhalten. Daher ist es erforderlich, die Qualität des Zerstäubungsprozesses unter instabilen Luftströmungsbedingungen vorausbestimmen zu können.

Der Schwerpunkt der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen lag auf der experimentellen Charakterisierung des Verhaltens eines Airblast-Zerstäubers unter dem Einfluss einer periodisch oszillierenden Luftströmung. Die Untersuchungen wurden in einem Aufbau ohne reaktive Strömung durchgeführt, um die Reaktion der Sprayeigenschaften und damit das Luft/Flüssigkeit Verhältnis (ALR, air to liquid ratio) als separates Phänomen zu untersuchen. Ziel dieser Untersuchungen war es, einen Einblick in die Instabilitätsphänomene zu erhalten, die in Triebwerksbrennkammern auftreten können, die unter der LPP-Prämisse (lean, premixed, pre-vaporized) bei hohen Drücken betrieben werden.

Da die Kopplung einer realen 3D-Strömung mit der Zerstäubung durch einen Airblast-Zerstäuber sehr komplex ist, wurde zur Analyse ein Airblast-Vorfilm-Zerstäuber mit einer zweidimensionalen Strömung entwickelt und realisiert

(Bild 2.7). Der Flüssigkeitsfilm wird in diesem System zwischen zwei Luftkanälen auf den Präfilmer aufgebracht. Die Kanäle münden am Ende des Präfilmers in einem Freistrahle. In diesen Versuchsaufbau wurde zusätzlich eine Pulsationsvorrichtung eingebaut, die es ermöglicht, einen Luftstrom mit nahezu idealer sinusförmiger Geschwindigkeit erzeugen zu können. Die Erregungsfrequenz dieser Modulation konnte dabei abhängig von der Drehzahl eines Servomotors eingestellt werden, während die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit und ihre Amplitude vom Gesamtluftstrom des Systems bzw. vom prozentualen Anteil der durch die Sirene strömenden Luft bestimmt waren. Das Verhalten des Airblast-Zerstäubungsprozesses konnte so auch unter instabilen Strömungsbedingungen beobachtet werden. Das Spray wurde unter verschiedenen Bedingungen eingehend untersucht und der Einfluss der oszillierenden Luftströmung auf die entstehenden Tröpfchen quantifiziert (Bild 2.8).

**Michał Majcherczyk:** Experimentelle Untersuchung der Zündung von Kerosin Jet A-1 unter subatmosphärischen Bedingungen.

(Prof. Dr. N. Zarzalis, Prof. Dr. D. Stapf)

Die Untersuchung der Wiederzündfähigkeit von neuentwickelten Triebwerken in Flughöhe (unter subatmosphärischen Bedingungen) ist mit einem großen technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Der kommerzielle Nutzen dieser Untersuchung hat außer einer erhöhten Sicherheit noch weitere Aspekte: das Verstehen des Zündprozesses könnte auch eine Verkürzung der Brennkammerlänge ermöglichen. Dies würde auch die Verkürzung der Triebwerkslänge bedeuten und als Folge eine Reduktion des Triebwerksgewichtes und demzufolge auch des Treibstoffverbrauchs bewirken. Als Hilfsmittel wurden hierzu numerische Methoden entwickelt,

um das nötige Brennkammervolumen für eine sichere Zündung bereits in der frühen Entwicklungsphase zu bestimmen.

Dabei erfolgt die Berechnung des erforderlichen Brennkammervolumens mit Hilfe von Kennzahlen, die dimensionsbehaftet sind. Darüber hinaus wurden die Kennzahlen anhand von Versuchen mit Brennkammern, die nach dem Konzept der Fett-Mager Verbrennung arbeiten, ermittelt. Dass diese Kennzahlen dimensionsbehaftet sind, zeigt ein nicht vollständiges Verständnis des Zündprozesses. Die Entwicklung von neuen Triebwerken, deren Brennkammer nach dem Konzept der Magerverbrennung arbeitet, erfordert daher auch ein vertieftes Verständnis des Zündprozesses auf der Basis von Grundlagenexperimenten.

Den Schwerpunkt der Arbeit stellt die Validierung und eventuelle Anpassung des überwiegend zur Auslegung angewandten Modells von Ballal und Lefebvre dar. Dieses berücksichtigt die bis jetzt ausführlichste Untersuchung von Mindestzündenergien und Löschdurchmessern von flüssigen Brennstoffen für Flugzeugantriebe, wird bis heute zur Berechnung des Flammenkerndurchmessers verwendet und dient als Basis für Simulationen der weiteren Zündphasen.

Um für die genannten Bedingungen relevante Untersuchungen durchführen zu können wurde eine Versuchsanlage ausgelegt und aufgebaut (Bild 2.9), die es ermöglicht in kontinuierlicher Betriebsweise Höhenbedingungen zu erzeugen (Temperaturen bis -30 °C und Drücke bis zu 0.4 bar absolut). Zudem wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht die Energie des Zündfunken sehr genau zu bestimmen.

Wichtige Erkenntnisse aus der Arbeit betreffen unter anderem die energetischen Eigenschaften von Funken bei der Zündung, die Auswirkung von Turbulenz auf die Flammenkerngenerierung sowie die Anpassung des Ballal-Lefebvre-Modells für die Beschreibung der Zündenergie in turbulenten Sprays (Bild 2.10). Die Forschungsergebnisse bieten eine solide Grundlage für zukünftige Entwicklungen und

Simulationen im Bereich der Verbrennungstechnik für Flugzeugtriebwerke.

**Alexios-Dionysios Martinos:** Experimental Investigation of Ignition under High Altitude Conditions with and w/o Effusion Cooling Interaction.

(Prof. Dr. N. Zarzalis, Prof. Dr. T. Koch)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Untersuchung über die Zündung von strömenden Kerosin (Jet A1)/Luft-Gemischen unter Bedingungen, wie sie in großer Höhe auftreten (niedrige Temperatur und Druck), durchgeführt. Es wurde der Einfluss verschiedener simulierter Höhen auf die Zündfähigkeit für zwei verschiedene Konfigurationen der Brennkammerwand (ohne und mit Effusionskühlung) ermittelt. Darüber hinaus wurden CFD-RANS-Simulationen und Spraymessungen unter den vorgegebenen Betriebsbedingungen durchgeführt, um die Untersuchung der Zündung zu unterstützen und das Verständnis für die Phänomene, die das Wiederzünden eines Strahltriebwerks in großer Höhe bestimmen, zu vertiefen.

Die Ergebnisse zeigen insbesondere, dass in der Konfiguration ohne Effusionskühlung der Druck die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Zündvorgangs für die angegebene maximale Zeit der Funkenerzeugung dominiert, da die Temperaturschwankungen in der untersuchten Testmatrix wesentlich begrenzt sind. Der allgemeine Trend zeigt, dass eine größere simulierte Höhe die Zündwahrscheinlichkeit bei konstantem Kraftstoffmassenstrom verringert. Niedrige Druck- und Temperaturbedingungen behindern mehrere wesentliche Mechanismen, die den Wiederzündungsprozess steuern. Die deutlichsten Auswirkungen betreffen die Qualität der Zerstäubung und die Reaktionsgeschwindigkeit, die sich insbesondere unter ungünstigen Betriebsbedingungen nachteilig auf die Zündung auswirken können.

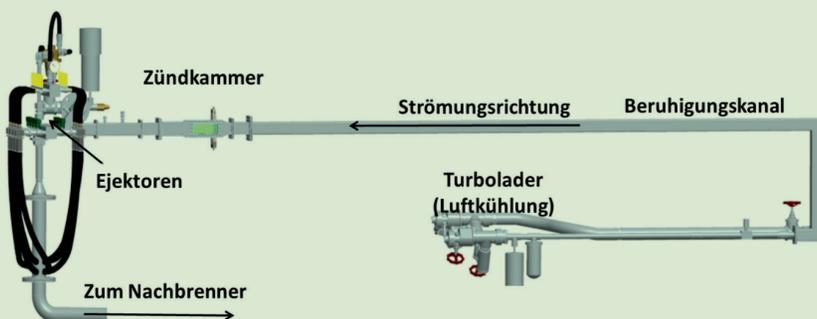


Bild 2.9: Übersicht über den IS CRA-Prüfstand (Ignition in Subatmospheric Conditions – Rig for Altitude relight)

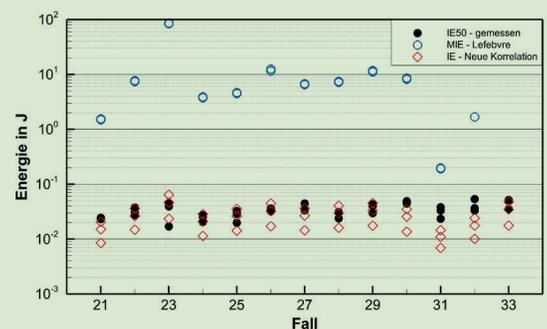


Bild 2.10: Unterschiede der gemessenen Zündenergien aller Messpunkte beim Einsatz unterschiedlicher Gitter. Vergleich von Korrelationen mit gemessenen Werten

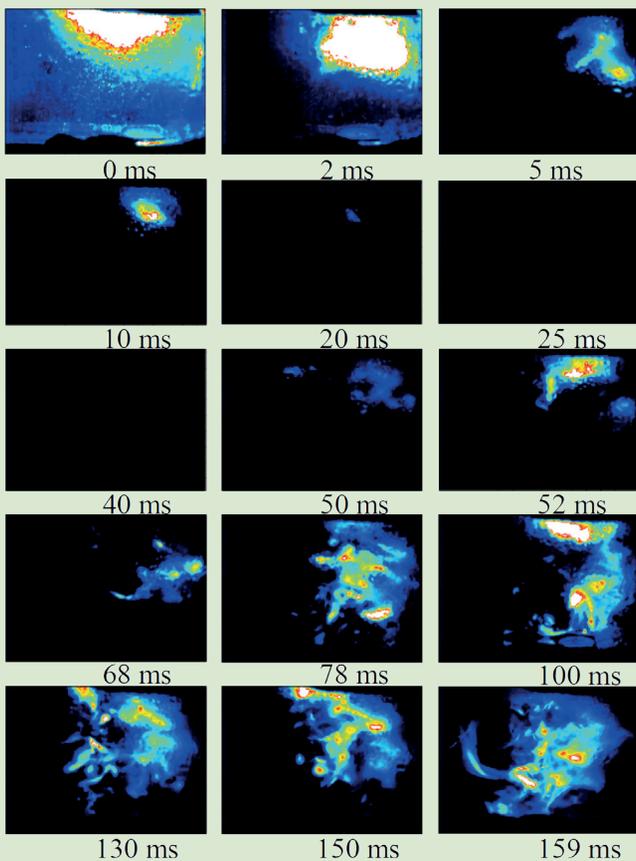
Eine gründliche Analyse der Spraycharakteristiken im Funkenbereich für beide Konfigurationen ergab, dass die zusätzliche Luft, die über die Effusionskühlungslöcher in die Primärzone eingeblasen wird und parallel zu den Auskleidungen strömt, den Flüssigkeitsfilm und die Bänder, die beim Aufprall des Sprays auf die Kammerauskleidung entstehen, auflöst („sekundäre Zerstäubung“). Der höhere relative Massenstrom

von Kerosintropfen zum Zeitpunkt des Funkens schafft daher günstige Bedingungen, da er ein reaktiveres Gemisch bildet als die frühere Konfiguration, bei der das Vorhandensein von Bändern vorherrscht. Somit ist die Zündfähigkeit mit Effusionskühlung deutlich verbessert, insbesondere in großen Höhen, was zu einer Zündwahrscheinlichkeit von 100 % für jede Betriebsbedingung der Testmatrix führt.

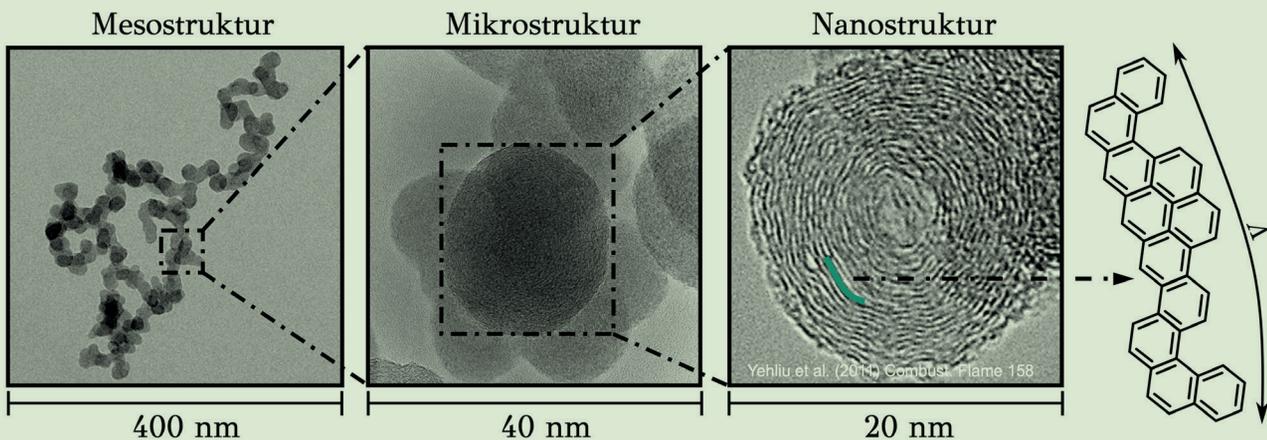
Mit einem selbst entwickelten Bildverarbeitungscode konnten systematische Analysen der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durchgeführt werden (Bild 2.11). Die qualitative Analyse zeigte, dass die Bewegung des reagierenden Gases von der Funkenregion zur inneren Rezirkulationszone für die Stabilisierung der Flamme wesentlich ist. Darüber hinaus wurden quantitative räumliche Informationen über die Verschiebung des Leuchtkraftzentrums der Flamme abgeleitet. Es zeigte sich, dass das Leuchtkraftzentrum der Flamme bei beiden Konfigurationen einem ähnlichen Weg folgt, während bei der Effusionskühlung die Zeitskala der Flammenentwicklung aufgrund der kürzeren Strömungsverweilzeit in diesem Fall kürzer ist. Letzteres hängt mit dem höheren Massenstrom zusammen, der bei der Effusionskühlung eingesetzt wird.

**Fabian P. Hagen:** Zur Struktur von Kohlenstoffnanopartikeln. (Prof. Dr. D. Trimis, Prof. Dr. S. Will)

Kohlenstoffnanopartikeln sind ambivalenter Natur. Mit einem Produktionsvolumen von > 13 Mt/a sind sie das weltweit am häufigsten hergestellte Nanopartikelsystem. Die nanoskalierten Teilchen werden als Funktions- oder Elektromaterial industriell eingesetzt, finden sich aber ebenfalls in Aerosolen aus Verbrennungsprozessen, als Schadstoffe in Schadensfeuern, Energieumwandlungsprozessen und verbrennungs-basierten Antrieben. Dabei sind die globalen Gesamtemissionen aus genannten Quellen, verglichen mit der intendierten Herstellung, von gleicher Größenordnung. In diesem Zusammenhang sind sie gesundheitsgefährdend und tragen erheblich zur globalen Erwärmung bei. Da sich sowohl die positiven als



**Bild 2.11:** Zündsequenz bei Referenzbedingungen und 1500 Hz, Strömungsrichtung von rechts nach links



**Bild 2.12:** Hochauflösende elektronenmikroskopische Aufnahmen der Meso-, Mikro- und Nanostruktur von Kohlenstoffnanopartikeln

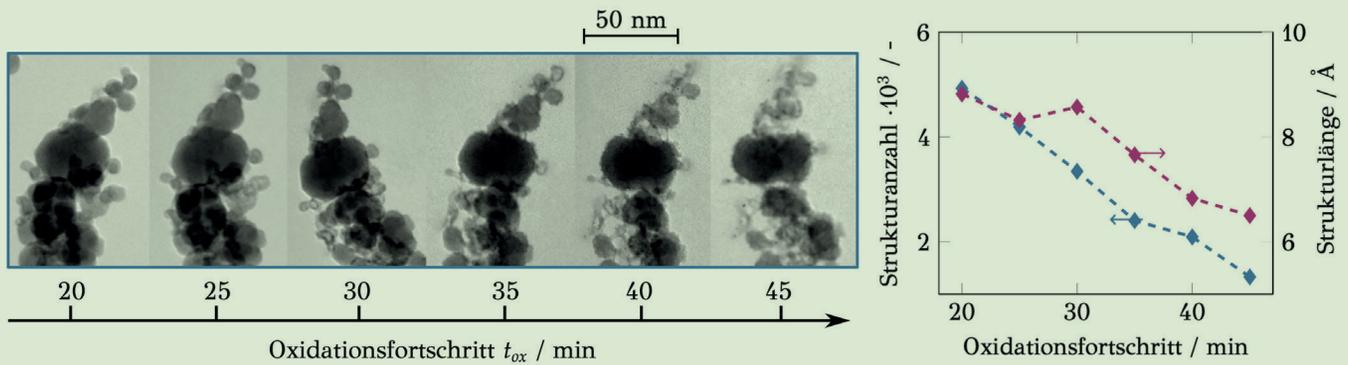


Bild 2.13: Verfolgung eines einzelnen Aggregats während der Oxidation bei 850 K

auch die negativen Aspekte auf den strukturellen Bauplan der Teilchen zurückführen lassen, bespricht die Arbeit die Struktur von Kohlenstoffnanopartikeln und deren Auswirkung auf ihre strukturassoziierten Eigenschaften. Während die Meso- und Mikrostruktur die Größenverteilungen der Aggregate sowie der Primärteilchen beschreibt, definiert die Nanostruktur den molekularen Aufbau der Primärpartikeln, die aus aromatischen Ringstrukturen, den Basisstruktureinheiten, mit statistisch verteilter Längenausdehnung aufgebaut sind (Bild 2.12).

In der Literatur wird bereits früh ein Einfluss der Ordnung, Ausdehnung und Orientierung der Basisstruktureinheiten auf das wellenlängenabhängige Absorptionsvermögen vermutet. Diese Hypothese wurde in der Arbeit sorgfältig geprüft, wobei ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Strukturgröße und dem Verhältnis der Brechungsindex-Absorptionsfunktion bei zwei monochromatischen Wellenlängen abgeleitet werden konnte. Der gefundene Zusammenhang ist linearer Natur und lässt sich auf die mit wachsender Strukturgröße abnehmende optische Bandlückenenergie, die wiederum das Absorptionsvermögen der Partikeln im nahinfraroten Spektralbereich determiniert, zurückführen. Werden nun quantitative Verknüpfungen zwischen einer gesuchten, für eine spezielle Fragestellung relevanten strukturassoziierten Eigenschaft und der nanostrukturellen Teilchenkonfiguration abgeleitet, wird deren berührungslose in situ Quantifizierung durch die Erfassung leicht zugänglicher Messinformationen möglich. Der Grundsatzbeweis einer schnellen, berührungslosen in situ Diagnostik einer exemplarischen strukturassoziierten Teilcheneigenschaft – der Oxidationsreaktivität – wurde mit der im Rahmen der Arbeit entwickelten Doppelpuls zeitaufgelösten laserinduzierten Inkandescenz, DP-TiRe-LII, im Abgasstrakt eines Serienmotors, der sowohl unter stationären als auch transienten Bedingungen betrieben wurde, erbracht. Damit wurde gleichzeitig der erste berührungslose Sensor für Nanostruktur und Oxidationsreaktivität vorgestellt.

Zu verstehen, wie sich Meso-, Mikro- und Nanostruktur während der Partikelbildung in Abhängigkeit von den Bildungsrandbedingungen entwickeln, eröffnet die Möglich-

keit einer gezielten Synthese von Teilchen maßgeschneiderter Topologie. Unter Zuhilfenahme neuentwickelter invasiver und laseroptischer Methoden wurde deshalb die Dynamik der Strukturveränderung der in Gegenstromflammen synthetisierten Teilchen während ihrer Bildungssequenz untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass sowohl der Primärteilchendurchmesser als auch die Längenausdehnung der Basisstruktureinheiten mit zunehmendem Volumenbruch anwachsen. Folgerichtig sind Mikro- und Nanostruktur miteinander korreliert, wobei lange Struktureinheiten in vergleichsweise große Partikeln eingebettet sind und vice versa.

Der abschließende Aspekt der Arbeit widmete sich der Aufklärung der Strukturveränderung während der Partikeloxidation mit molekularem Sauerstoff, wobei der Fokus auf die Abhängigkeit von der initialen Teilchenstruktur gelegt wurde. Es wurde eine stetige Veränderung der Mesostruktur mit zunehmendem Oxidationsfortschritt beobachtet, da die Teilchendichte der Aggregate aufgrund der vollständigen Oxidation der einzelnen Partikeln abnahm und sich folglich auch der Aggregatdurchmesser reduzierte (Bild 2.13). Weiter konnte gezeigt werden, dass sich die Veränderung der Mikrostruktur in Abhängigkeit der nanostrukturellen Konfiguration zwischen zwei gekoppelten Grenzfällen bewegt, der internen und der Oberflächenoxidation. Reaktionsfreudige Teilchen, die aus kurzen, gekrümmten Basisstruktureinheiten aufgebaut sind, reagierten bevorzugt in einer Oberflächenoxidation. Hingegen neigten Teilchen mit langen Basisstruktureinheiten zur internen Oxidation und verloren vergleichsweise langsam an Masse. Einer Fragmentierung langer Struktureinheiten folgte die Konversion der einzelnen Segmente.

#### 2.4 Forschungsstelle für Brandschutztechnik IMK-Themen

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik ist von den Ländern beauftragt, anwendernahe Forschung für die Feuerwehren durchzuführen.

**Lehre und Weiterbildung an der Landesfeuerweherschule Bruchsal und an der angegliederten Akademie für Gefahrenabwehr**

2023 wurde an der Landesfeuerweherschule BaWü Unterricht für die Lehrgangsteilnehmer des höheren und gehobenen Dienstes gehalten.

**Bestandsaufnahme über die kommende Verbreitung von Wasserstoff in Industrie, Gebäuden, Verkehr und Versorgungsnetzen sowie die damit einhergehenden spezifischen Gefahren (Projektlaufzeit: 2023-2024)**

Mit der „Energiewende“ wird die Verbreitung von Wasserstoff in den nächsten Jahren rasch zunehmen. Angefangen von der Stahlindustrie und Fahrzeugen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen über die Einleitung von Wasserstoff in das Erdgasversorgungssystem und mit Wasserstoff betriebenen Verkehrsflugzeugen (Airbus) werden die Feuerwehren mit neuen Aufgaben aber auch Gefahren umzugehen haben. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden im Jahr 2023 (fortlaufend 2024) folgende brandschutzrelevante Schwerpunkte bearbeitet:

- Literaturoberprüfung (Recherche): Stand des Wissens (aus brandschutztechnischer Sicht), gesetzliche Vorgaben und Sicherheitsmaßnahmen:
  - Wasserstoff im ruhenden und fließenden Verkehr (als Antrieb oder als Transportgut)
  - Stationäre Wasserstoff-Brennstoffzellen
  - Einleitung von Wasserstoff in das Erdgasversorgungsnetz (Anreicherung des Erdgases mit Wasserstoff)
  - Mit Wasserstoff betriebene Verkehrsflugzeuge.
  - Wasserstofftankstellen
  - Herstellung und Verwendung in der Industrie
  - Löschmethoden? Vorgehensweise.
- Abschätzung und CFD-Simulationen von Störfallszenarien (hohe Mengen an freigesetztem Wasserstoff in kurzer Zeit) bei Tankstellen oder Verteilernetzen. Ausbreitung des Wasserstoffs bei verschiedenen atmosphärischen Parametern und Eingrenzung des Ex-Gefahrenbereichs (2024).
- CFD-Simulationen einer Leckage (geringe Freisetzung von Wasserstoff über einen längeren Zeitraum) im Verteilernetz. Vergleich der Ausbreitung von reinem Erdgas (Stand heute in den Verteilernetzen) und unterschiedliche Anreicherung des Erdgases mit Wasserstoff (in den kommenden Jahren) im Verteilernetz. Eingrenzung des Ex-Gefahrenbereichs (2024).

**Laufende Forschungsarbeiten**

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

**Verbesserung der Sicherheit von H<sub>2</sub>-Druckbehältern im Brandfall z. B. durch Applikation eines wärmeleitfähigen Materials zur Erhöhung der Auslösezuverlässigkeit eines temperatúrauslösenden Sicherheitsventils (TPRD), Teilprojekt:**

**Experimentelle und simulationsgestützte Untersuchung und Verbesserung des Wärmetransports hin zum temperatúrauslösenden Sicherheitsventil (AiF ZIM Projekt, Projektpartner K.TEX GmbH, Projektlaufzeit: 2023-2025)**

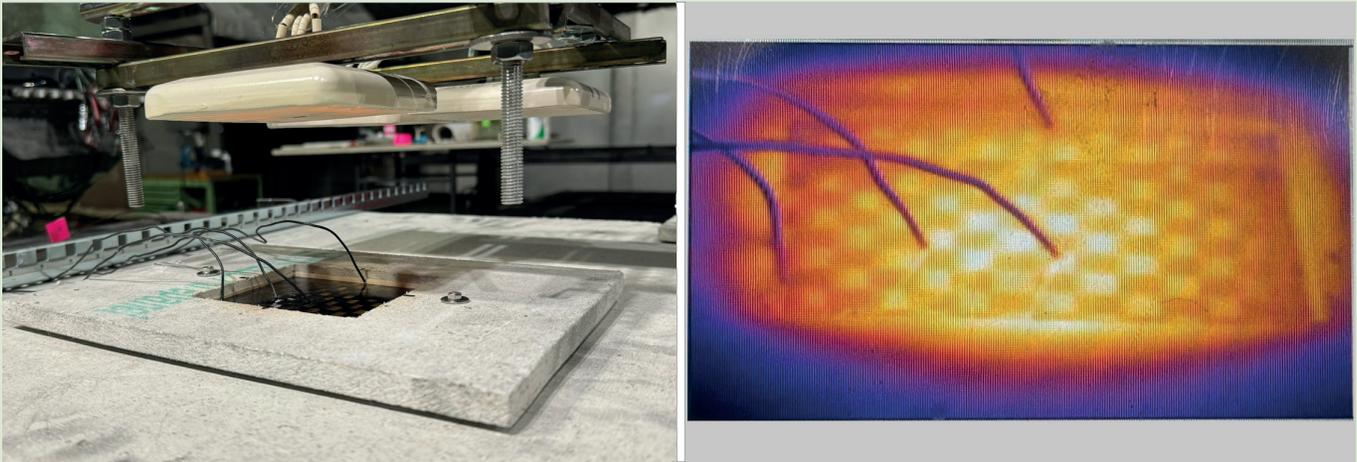
Zukünftig werden Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb häufiger anzutreffen sein, wobei dieser bei PKW in Druckbehältern mitgeführt wird. Damit diese im Brandfall nicht bersten, verfügen sie über ein temperatúrausgelöstes Sicherheitsventil (TPRD, temperature pressure relief device), welches ab 110 °C öffnet. Die TPRD werden in genormten Tests auf ihre Wirkung überprüft, in dem der Behälter beflammt wird. Das TPRD muss rechtzeitig öffnen, so dass die Druckabnahme schneller erfolgt als die Strukturschwächung des Behälters, damit er nicht berstet. Im realen Brandfall allerdings, ist die homogene flächige Beflammung nicht der Fall und bei Beflammung auf der dem TPRD abgewandten Seite kann es zum Behälterversagen durch Bersten kommen, weil das TPRD sich nicht schnell genug aufheizt und damit die Druckentlastung bewirkt. In dem Projekt werden unterschiedliche in bzw. auf den Compositverbund der Druckbehälter eingearbeitete Materialien auf ihre Wärmetransportfähigkeit hin untersucht und ausgelegt, so dass das TPRD sich bei einseitiger Beflammung schneller aufheizt und öffnet und somit das Bersten eines Druckbehälters bei Beflammung nahezu ausgeschlossen werden kann.

Im Jahr 2023 wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- Vorbereitende Maßnahmen, vertiefende technische Recherchen und Definition der Anforderungen sowie die physikalischen und numerischen Randbedingungen für die CFD-Simulation
  - Recherche hinsichtlich gewünschter Materialeigenschaften
  - Definition Probeparameter (incl. Applikation eines wärmeleitfähigen Materials)
  - Dimensionierung der Proben (incl. Applikation eines wärmeleitfähigen Materials)
- Aufbau Versuchsstand an der FFB
  - Definition der wichtigsten messbaren Größen und Parameter hinsichtlich Auslegung des Prüfstands
  - Auslegung und Dimensionierung des Prüfstands für die thermische Beaufschlagung von Proben mit unterschiedlichen Applikationen von wärmeleitfähigen Materialien
  - Erste Orientierungsversuche mit Proben mit bekannten Eigenschaften (s. Bild 2.14)

**2.5 DVGW-Forschungsstelle und Prüflaboratorium Gas**

Die Abteilung unter der Leitung von Dr. Jens Hoffmann teilt sich in vier Fachbereiche auf. Diese sind die Abteilungen Verbrennungstechnik, Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen, Armaturen und Forschung Gasanwendung. Hauptaugenmerk liegt auf der Prüfung von Gasgeräten und Bauteilen in der Gasversorgung und Komponenten für Gasgeräte. Der Bereich Forschung gewinnt durch die fortbestehende Priorisierung des Themenbereichs Wasserstoffs weiter Gewicht und hatte in 2023 erhebli-



**Bild 2.14:** Erste Orientierungsversuche mit CFK-Platten

chen Einfluss auf die Prüfbereiche. Nachfolgend findet sich ein Rückblick auf 2023 aus Sicht der Prüfung und Forschung.

#### Prüflaboratorium Gas - Allgemein

In Jahr 2023 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 Druckgeräteverordnung 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 wiederholt erfolgreich gestaltet werden. In diesem Fall ist auch der Bereich Prüfung aus dem Bereich Gastheorie 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 Temperaturmessanordnungen und Klimaschränken wiederholt 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.

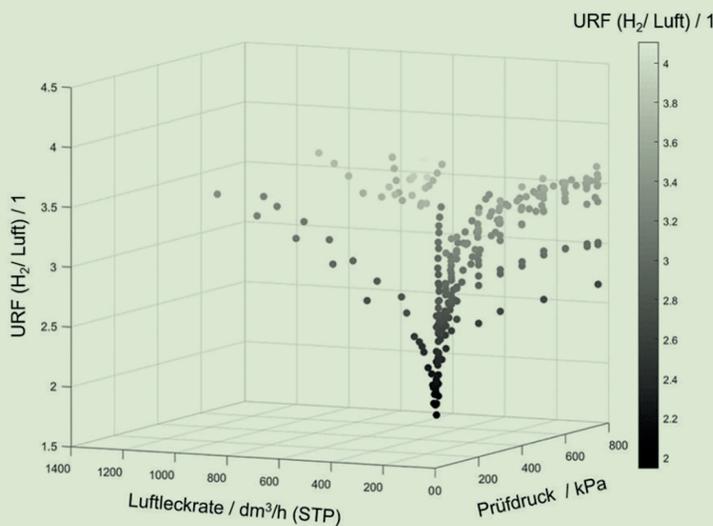
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es somit dem Labor möglich ist, Prüfungen aller Komponenten und Materialien sowie Sicherheitseinrichtungen, der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischer Phänomene im Komplettpaket durchzuführen.

Die Kompetenzen des Prüflaboratoriums (gestützt durch die intensive Teilnahme an der Gesetzgebung 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.

#### Prüflaboratorium Gas – Normung und Standardisierung

Auch im zurückliegenden Jahr setzten sich die Mitarbeiterinnen des Prüflaboratoriums im Rahmen der Gesetzgebung, 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 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 wurden und dabei die Anpassung an die Verordnung (EU) 2016/426 über Geräte zur Verbrennung gasförmiger Brennstoffe (GAR) umzusetzen. In vielen Technischen Komitees des CEN (z. B.



**Bild 2.15:** 3D-Übersicht der  $H_2$ -Umrechnungsfaktoren von allen Testlecks als Funktion der Leckrate und des Prüfdruckes, Quelle: Abschlussbericht G202138, „ECLHYPSE – Experimentelle Charakterisierung der Leckraten von Prüfleck mit  $H_2$  und/oder  $CH_4$ - $H_2$ -Gasgemischen gegenüber Luft

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. Darüber hinaus haben die Mitarbeiter der Prüfstelle intensiv an der Entwicklung von Zertifizierungsprogrammen (ZP's) der DVGW CERT GmbH aktiv unterstützt. Entsprechende Verfahren (u.a. ZP3100.20, ZP3100.100, ZP 4110, ZP5101, ...) wurden bereits bei aktuellen Zertifizierungsprozessen und zugehörigen Prüfungen eingesetzt.

Zudem engagierten sich die Mitarbeiter des Prüflaboratoriums in der Normungsroadmap Wasserstoff des DINs. In diesem Projekt soll auf nationaler Ebene das Wissen bzgl. Wasserstoff und internationaler Wasserstoffnormung gebündelt werden und in weiteren Schritten in nationale Normen gem. einer Priorisierungsliste einfließen. Mehr Details dazu kann man auf der Homepage des DINs finden.

### 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 %  $H_2$ -Zumischung sowie 100 %  $H_2$ ) eine herausragende Aktivität (siehe auch oben). 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.

Im 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 warten 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.

Allgemein lässt sich sagen, dass die Anzahl der Prüfaufgaben und der allgemeinen Anfragen in den Bereichen Verbrennungstechnik, Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen und Armaturen der Hersteller weitestgehend beständig waren. Lediglich im Bereich der Wasserstoffprüfungen zeigten sich wie oben erwähnt die Hersteller teilweise zurückhaltend.

### Prüflaboratorium Gas – Forschung und Entwicklung

In diesem Bereich standen im Jahr 2023 weitreichende personelle Veränderungen an. Herr Omid-Henrik Elhami verließ die DVGW-Forschungsstelle, ebenso Herr Holger Dörr. Letzterem möchten wir an dieser Stelle herzlich zu seiner neuen Stelle als Professor für Gasversorgung/Brenngastechnik an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Wolfenbüttel gratulieren.

Bei der Weiterentwicklung der Forschungsaktivitäten lag auch in 2023 der Fokus auf der Wasserstoffthematik. Dabei wurden neben den schon laufenden Projekten, weitere Projekte initiiert, mit folgenden Schwerpunkten.

- Umstellung der Gasinfrastruktur auf Methan/Wasserstoffgemische und zum Teil auf 100 Vol.-%  $H_2$ : Materialverträglichkeit, regulatorische Aspekte (EU und DVGW-Regelwerk), Sicherheits- und Messkonzepte
- Abtrennung von  $CO_2$  und  $H_2$  aus Prozessgasen
- Dichtheits- bzw. Leckratenmessungen mit  $H_2$
- Direkte energetische Nutzung von  $NH_3$

Diese Projekte werden nachfolgend zusammenfassend vorgestellt.

**Dichtheits- bzw. Leckratenmessung: ECLHYPSE-Projekt**

Das am 01.04.2022 gestartete DVGW-Projekt fokussiert auf die Ermittlung von Umrechnungsvorschriften, um Luftleckraten auf verschiedene brennbare Gase ( $H_2$ ,  $CH_4$  und deren Mischungen) über einen breiten Druckbereich umrechnen zu können. Somit soll sichergestellt werden, dass in der industriellen Produktion weiter mit Luft geprüft werden kann, aber auch Baumusterprüfungen sicher durchgeführt werden können. Dabei liegt der Fokus auch auf den Strömungsphänomenen, v.a. in dem Übergangsregime. Zur Charakterisierung der Leckraten wurden zusammen mit dem Partner GWI verschiedene Messmethoden (basierend auf dem Volumenstrom- und dem Druckabfallprinzip) und verschiedene Prüfstände aufgebaut und eingesetzt, wie z. B. einem Massendurchfluss-Prüfstand (MFM-Methode), wie in **Bild 2.15** zu sehen ist. Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und Reproduzierbarkeit. Die ermittelten Umrechnungsfaktoren (siehe auch **Bild 2.15**) erlauben die Abdeckung mehrerer Anwendungen vom Verteilnetz bis zum eingebauten Gerät in der Hausinstallation. Das Projekt wurde im Jahr 2023 erfolgreich abgeschlossen und die entsprechenden Ergebnisse sind auch schon in Technischer Report CEN/TR 17924:2023-05 „Sicherheits- und Regeleinrichtungen für Brenner und Brennstoffgeräte für gasförmige und/oder flüssige Brennstoffe. Leitfaden zu wasserstoffspezifischen Aspekten“ auf CEN-Ebene eingeflossen.

**Abtrennung von  $CO_2$  und  $H_2$  aus Prozessgasen: MemKoWi**

Im Rahmen des im November 2022 gestarteten BMWK-Projekts sollen Membranen zur Abscheidung von  $CO_2$  und  $H_2$  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 ebenfalls die Literaturrecherche koordinieren. Mittlerweile wurden in 2023 erste Charakterisierungsmessungen durchgeführt. 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.-% Wasserstoff untersucht werden. Der DVGW-EBI Beitrag umfasst neben der 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  $H_2$ -Dichtheitsuntersuchungen von Verteilnetz-Bestandskomponenten mit einem Druckabfall-Prüfstand, der am EBI aufgebaut wurde.

Zusätzlich wurde in 2023 die Bestandsaufnahme der Prüf- und Zertifizierungsverfahren gestartet, welche im Rahmen einer Aufgabenübernahme von der DVGW CERT GmbH (CERT)

durchgeführt wird. In enger Abstimmung mit der CERT wurde begonnen, systematisch die Prüf- und Zertifizierungsgrundlagen für alle Materialien und Komponenten der Inventarisierungsliste zu recherchieren und in der Inventarisierungsliste zu ergänzen.

Außerdem wurde der Druckabfall-Prüfstand mechanisch und elektronisch fertiggestellt und laborseitig an die Prüfgase angeschlossen. Die Funktionalität sowie die Dichtigkeit des Prüfstands wurden mit Stickstoff und Wasserstoff erfolgreich getestet.

Der systematische Auswahlprozess bezüglich der zu testenden Komponenten wurde anhand der Inventarisierungsliste zusammen mit SWK und DBI erarbeitet. Auf Basis dessen wurden entsprechende Bestandskomponenten von den Netzbetreibern ausgewählt. Die ersten Komponenten sind beim EBI eingetroffen und wurden anschließend mechanisch für eine passende Prüfstandsanzbindung bearbeitet. Die Inbetriebnahme des Prüfstands inklusive Messperipherie wurde erfolgreich durchgeführt.

Das Projekt wird im Jahr 2024 beendet werden.

**FuE für  $H_2$** 

Das Forschungsprojekt zur Ergänzung und Zusammenführung von Ergebnissen für die Normung und Regelsetzung zu Wasserstoff in der öffentlichen Gasversorgung wurde in 2023 seitens der DVGW-Forschungsstelle erfolgreich abgeschlossen. Neben experimentellen Untersuchungen an Elastomerwerkstoffen konnte auch eine Materialdatenbasis zusammen mit dem DBI kompiliert werden, um den Stand der Technik, abgebildet auf die gasfachlichen Anforderungen, darzustellen. Hierbei wurden insbesondere auch neueste Forschungsergebnisse aus eigenen Untersuchungen und auch aus den bruchmechanischen Studien von Metallwerkstoffen der SyWestHy einbezogen. Insgesamt kann für viele Bereiche der öffentlichen Gasversorgung bezüglich der Materialverträglichkeit und Dichtheit eine Eignung festgestellt werden. Anpassungen im Regelwerk finden im Rahmen des technischen Fortschritts nun immer unter Einbeziehung der 5. Gasfamilie, den wasserstoffreichen trockenen Gasen statt.

 **$H_2$ -20**

Das große DVGW/Avacon-Pilotvorhaben  $H_2$ -20 startete mit der dynamischen Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas in das Jahr 2023. Dabei wurde die Beimischung von Wasserstoff arbeitstäglich von 0 bis 20 Vol.-% auf- und absteigend variiert (siehe auch **Bild 2.16**). Auch in dieser Beimischphase in der Heizsaison 2022/23 konnten die sehr guten Ergebnisse der 1. Heizsaison 2021/22 mit Stichprobenmessungen und Monitoring einiger Anlagen bestätigt werden, es traten keine sicherheitsrelevanten Auffälligkeiten im Zusammenhang mit der Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas bis zu 20 Vol.-% bei den über 350 unveränderten Gasgeräten auf. Zudem konnten umfangreiche Untersuchungen an ausgetauschten Gasgeräten aus der Modellregion auf den Prüfständen im Prüflabor vorgenommen werden, die auch bei den mitunter über

30 Jahre alten gebrauchten Geräten keine sicherheitstechnischen Einschränkungen beim Betrieb mit dem Prüfgas G 22, das 35 Vol.-% Wasserstoff in Methan enthält, aufzuzeigen. Damit konnte auch im Bestand der Nachweis erbracht werden, dass eine Beimischung in einem unveränderten Bestand in vielen Netzgebieten vergleichbar der Modellregion Fläming bereits heute möglich ist. Diese positiven Ergebnisse wurden auch durch die Wasserstoff-Insel Öhringen gestützt. Das Projekt H<sub>2</sub>-20 konnte plangemäß und erfolgreich mit einer Abschlusserhebung und der Abschlussberichtserstellung zum 31.07.2023 abgeschlossen werden.

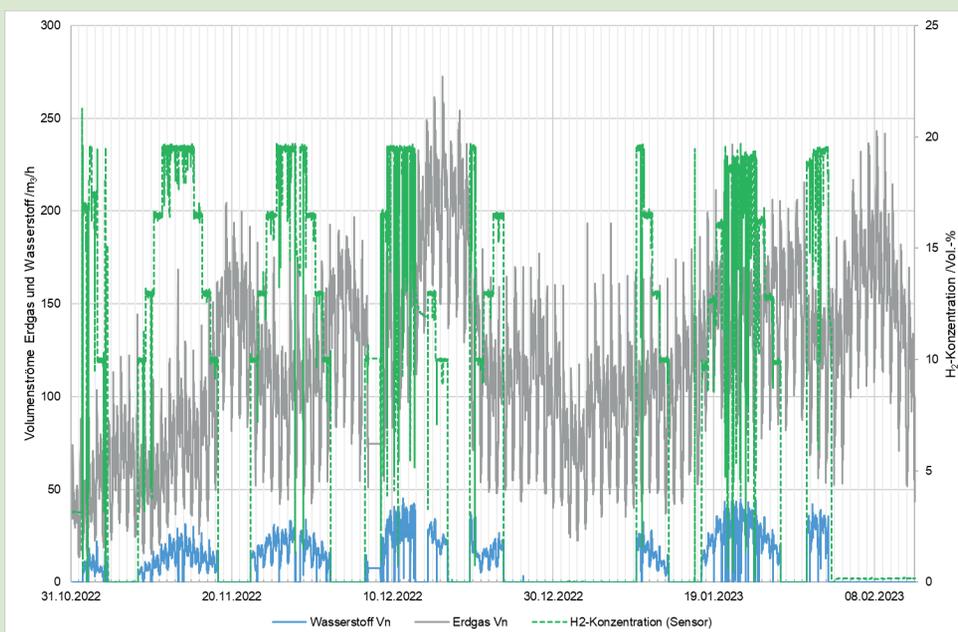
### Wasserstoff-Insel Öhringen

In Öhringen konnte die Wasserstoffbeimischung zu Erdgas sogar mit bis zu 30 Vol.-% bei einem gegenüber H<sub>2</sub>-20 deutlich kleineren Bestand mit 32 Gasgeräten erfolgreich fortgesetzt werden. Hier waren die Geräte vor der Beimischung gewartet worden, einige ältere teilvormischende Gasgeräte aus den 90er Jahren waren in Zusammenarbeit mit den Herstellern durch moderne Brennwertgeräte ersetzt worden. Auch hier fanden in 2023 unter anderem dynamische Beimischungen mit variierenden Wasserstoffkonzentration zwischen 0 und 30 Vol.-% statt, bei denen ebenfalls keine Auffälligkeiten bei den bis zu 34 Jahre alten Gasgeräten auftraten, was analog zu H<sub>2</sub>-20 durch umfangreiche Stichproben nachgewiesen werden konnte. Diese Ergebnisse zeigten in Verbindung mit H<sub>2</sub>-20, dass die Beimischung von 20 Vol.-% ergänzend zu den vielfältigen Messungen an Laborprüfständen im Bestand als keineswegs grenzwertig einzustufen ist. Zumindest konnte hier technisch auch nachgewiesen werden, dass das Beimischkonzept mit modernen und aber auch einigen älteren Bestandsgeräten auf prinzipiell 30 Vol.-% Beimischung erweiterbar wäre. Das Projekt der „Wasserstoff-Insel Öhrin-

gen“ konnte durch den Auftraggeber Netze BW im April 2024 abgeschlossen werden.

### H2Direkt

Die DVGW-Forschungsstelle war durch die Thüga-Gruppe für das Umstellprojekt H2Direkt bezüglich des Sicherheits-, Messkonzepts und der Kapazitätsauslegung beauftragt worden. Mit umfangreichen Zusammenstellungen von Einzelkomponentenbewertungen seitens der Hersteller und der Forschungsstelle konnten sowohl das bestehende Gasnetz als auch die Gasinstallationen für die Umstellung vorbereitet werden. Durch Berechnung der Leitungskapazitäten konnte auch eine ausreichende Dimensionierung der Gasleitungen für die Umstellung bestätigt werden. In der Gasinstallation mussten nur die Balgengaszähler aufgrund des volumenbezogenen geringeren Brennwertes von Wasserstoff gegenüber Erdgas H durch Zähler der Zählergröße G6 statt G4 ausgetauscht werden. Eine Unbedenklichkeitsfeststellung der Balgengaszähler wurde zusammen mit der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) dem Eichamt zur Verfügung gestellt, um eine eichamtlich korrekte Gasabrechnung gemäß der DVGW-Arbeitsblätter G 685-1 bis 8 durchführen zu können. Als weitere Maßnahme wurden die Erdgasgeräte durch Wasserstoff-Brennwertgeräte des Herstellers Vaillant ausgetauscht, die für den 100 % Wasserstoffbetrieb zertifiziert waren. Mit den erfolgreichen Vor- und Zuarbeiten der DVGW-Forschungsstelle für die Thüga-Gruppe konnte am 14.09.2023 die Umstellung in Hohenwart offiziell im Beisein der bayrischen Staatsregierung eingeweiht werden. Damit ist zu den Beimischprojekten H<sub>2</sub>-20 und der Wasserstoff-Insel Öhringen auch die Umstellung auf Wasserstoff gemäß der 5. Gasfamilie,



**Bild 2.16:** Volumenströme von Erdgas und Wasserstoff und die H<sub>2</sub>-Konzentration in der dynamischen Beimischungsphase, Quelle: Abschlussbericht G201902, „Wasserstoff in der Gasinfrastruktur: DVGW / Avacon-Pilotenprojekt mit bis zu 20 Vol.-% Wasserstoffeinspeisung in Erdgas“

Gruppe A DVGW-Arbeitsblatt G 260:2021 in der Praxis umgesetzt.

### ThyGA

Im Rahmen des EU-Projekts konnte das Messprogramm der 23 eingeplanten Geräte erfolgreich abgeschlossen werden. Verschiedene Gerätetypen (v.a. Brennwertgeräte, Kochgeräte und Grillgeräte) mit bis zu 60 Vol.-% H<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub> wurden gemessen. Dabei wurden alle Sicherheits- und Funktionsaspekten geprüft (verzögerte Zündung, Teil- und Vollastverhalten, Emissions- und Wirkungsgradmessungen...). Das Projekt wurde im März 2023 abgeschlossen und die Ergebnisse hieraus finden nun nach und nach Einfluss auf die europäische Gasgerätenormung auf CEN-Ebene.

### Energetische Nutzung von Ammoniak

In diesem geplanten Projekt soll die Rolle von Ammoniak als Wasserstoffderivat zur direkten energetischen Nutzung in industriellen Anwendungen untersucht werden. Die Entwicklung dieses Projektes sowie der Aufbau eines dafür nutzbaren Ammoniak-Labors startete 2023 und soll 2024 in die Umsetzung gehen.

## 2.6 Veröffentlichungen des Institutsteils Verbrennungstechnik 2023

### Journal- und Buchveröffentlichungen

- [1] 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 industrial coil coating lines. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 42 (2023) S. 101843, DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101843.
- [2] Bihler, S.; Braun, J.: Kontamination des Löschwassers nach Brand einer Lithium-Ionen-Batterie. *BRANDSchutz* 77 (2023) Nr. 3, S. 33-35.
- [3] Buchheiser, S.; Deutschmann, M. P.; Rhein, F.; Allmang, A.; Fedoryk, M.; Stelzner, B.; Harth, S.; Trimis, D.; Nirschl, H.: Particle and Phase Analysis of Combusted Iron Particles for Energy Storage and Release. *Materials* 16 (2023) Nr. 5, S. 2009, DOI: 10.3390/ma16052009.
- [4] Denev, J. A.; Zirwes, T.; Zhang, F.; Bockhorn, H.: A low-pass filter for linear forcing in the open-source code OpenFOAM – Implementation and numerical performance. *High Performance Computing in Science and Engineering* ,21, (2023), S. 339-352, Nagel, W.E.; Kröner, D.H.; Resch, M. M. (ed.), Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-031-17937-2\_20.
- [5] Dinkov, I.; Zeh, K.: Unterventilierte Realbrände. *BRANDSchutz* 77 (2023) Nr. 12, S. 10-20.
- [6] Eckart, S.; Pio, G.; Zirwes, T.; Zhang, F.; Salzano, E.; Krause, H.; Bockhorn, H.: Impact of carbon dioxide and nitrogen addition on the global structure of hydrogen flames. *Fuel* 335 (2023) S. 126929, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126929.
- [7] Fedoryk, M.; Stelzner, B.; Harth, S.; Trimis, D.: Experimental investigation of the laminar burning velocity of iron-air flames in a tube burner. *Appl. Energy Combust. Sci.* 13 (2023) S. 100111, DOI: 10.1016/j.jaecs.2022.100111.
- [8] Ghasemi, A.; Christou, T.; Kok, J. B. W.; Stelzner, B.; Zarzalis, N.: Combustion dynamics analysis of a pressurized airblast swirl burner using proper orthogonal decomposition. *Int. J. Spray Combust. Dyn.* (2023) Nr. 17568277231207252, S. 1-17, DOI: 10.1177/17568277231207252.
- [9] Gietzelt, T.; Sentko, M. M.; Stelzner, B.; Trimis, D.: Manufacturing of a Burner Plate by Diffusion Bonding to Investigate Premixed Fuel-Rich Oxy-Fuel Flames at Increased Pressure and Preheating. *Chem. Eng. Technol.* 46 (2023) Nr. 7, S. 1533 - 1538, DOI: 10.1002/ceat.202200442.
- [10] Hagen, F. P.; Vlavakis, P.; Bockhorn, H.; Suntz, R.; Trimis, D.: From molecular to sub- $\mu\text{m}$  scale: The interplay of precursor concentrations, primary particle size, and carbon nanostructure during soot formation in counter-flow diffusion flames. *Combust. Flame* (2023) S. 112729, DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112729.
- [11] Hagen, F. P.; Kretzler, D.; Koch, S.; Bockhorn, H.; Suntz, R.: On-line monitoring of carbon nanostructure and soot reactivity in engine exhaust by dual-pulse laser-induced incandescence. *Combust. Flame* 254 (2023) S. 112850, DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112850.
- [12] 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. *Proc. Combust. Inst.* 39 (2023) S. 1119-1128, DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.253.
- [13] Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2022, Teil 1. *gwf Gas + Energie* 164 (2023) Nr. 06.
- [14] Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2022. *gwf Gas + Energie* 164 (2023) Nr. 07-08.
- [15] Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2022. *gwf-Wasser|Abwasser* 164 (2023) Nr. 06.
- [16] 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.* 39 (2023) Nr. 2, S. 2199-2208, DOI: 10.1016/j.proci.2022.08.060.
- [17] 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. *Combust. Flame* 253 (2023) S. 112778, DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112778.
- [18] Meller, D.; Engelmann, L.; Stein, O. T.; Kempf, A. M.: Exhaust Gas Recirculation (EGR) analysis of a swirl-stabilized pulverized coal flame with focus on NOx release using FPV-LES. *Fuel* 343 (2023) S. 127939, DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127939.
- [19] Schelb, D.: E-Fahrzeuge in Tiefgaragen: Herausforderung für den Brandschutz?. *Feuertrutz Magazin* 7 (2023) Nr. 4.
- [20] Schelb, D.: PKW mit Wasserstoff an Bord. *Schadenprisma* 52 (2023) Nr. 2, S. 26-29.
- [21] Schwagerus, A.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.: Numerical calculation of the lean-blow-out in a multi-jet burner. *High Performance Computing in Science and Engineering* ,21, (2023), S. 497-511, Nagel, W.E.; Kröner, D.H.; Resch, M. M. (ed.), Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-031-17937-2\_31.
- [22] Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Oxidation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Evidence of Similarities in Thermochemical Properties and Reaction Paths. *Combust. Sci. Technol.* 195 (2023) Nr. 14, S. 3341-3356, DOI: 10.1080/00102202.2023.2239452.
- [23] Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Oxidation of the 1-Naphthyl Radical C<sub>10</sub>H<sub>7</sub>• with Oxygen: Thermochemistry, Kinetics and Possible Reaction Pathways. *Int. J. Chem. Kinet.* (2023), DOI: 10.1002/kin.21702.
- [24] 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.* 39 (2023) Nr. 2, S. 2149-2158, DOI: 10.1016/j.proci.2022.09.026.
- [25] 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. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 38 (2023) S. 101545, DOI: 10.1016/j.tsep.2022.101545.
- [26] Vignat, G.; Zirwes, T.; Toro, E. R.; Younes, K.; Boigné, E.; Muhunthan, P.; Simitz, L.; Trimis, D.; Ihme, M.: Experimental and numerical investigation of flame stabilization and pollutant formation in matrix stabilized ammonia-hydrogen combustion. *Combust. Flame* 250 (2023) S. 112642, DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112642.
- [27] Vignat, G.; Toro, E. R.; Zirwes, T.; Boigné, E.; Dimosthenis, T.; Ihme, M.: Experimental investigation of thermal resilience and relight behavior of ammonia/hydrogen/air flames in a novel porous media burner. *Proc. United States National Combustion Meeting*, 13, (2023).
- [28] Wang, Y.; Han, W.; Zirwes, T.; Attili, A.; Cai, L.; Bockhorn, H.; Yang, L.; Chen, Z.: A systematic analysis of chemical mechanisms for ethylene oxida-

- tion and PAH formation. *Combust. Flame* 253 (2023) S. 112784, DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112784.
- [29] 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.* 39 (2023) Nr. 2, S. 1515-1524, DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.024.
- [30] Zhang, F.; Wachter, S.; Zirwes, T.; Jakobs, T.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Kolb, T.; Stapf, D.: Effect of nozzle upscaling on coaxial, gas-assisted atomization. *Phys. Fluids* 35 (2023) Nr. 4, S. 043302, DOI: 10.1063/5.0141156.
- [31] Zhang, F.; Zirwes, T.; Wachter, S.; Jakobs, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Kolb, T.; Bockhorn, H.; Stapf, D.: Numerical simulations of air-assisted primary atomization at different air-to-liquid injection angles. *Int. J. Multiphase Flow* 158 (2023) S. 104304, DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104304.
- [32] Zhang, F.; Zirwes, T.; Häber, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Suntz, R.; Stapf, D.: Correlation of heat loss with quenching distance during transient flame-Wall interaction. *Proc. Combust. Inst.* 39 (2023) Nr. 2, S. 2037-2045, DOI: 10.1016/j.proci.2022.10.010.
- [33] Zirwes, T.; Sontheimer, M.; Zhang, F.; Abdelsmie, A.; Hernández, P. F. E.; Stein, O. T.; Im, H. G.; Kronenburg, A.; Bockhorn, H.: Assessment of Numerical Accuracy and Parallel Performance of OpenFOAM and its Reacting Flow Extension EBLdmsFoam. *Flow Turbul. Combust.* 111 (2023) S. 567-602, DOI: 10.1007/s10494-023-00449-8.
- [34] Zirwes, T.; Zhang, F.; Bockhorn, H.: Memory effects of local flame dynamics in turbulent premixed flames. *Proc. Combust. Inst.* 39 (2023) Nr. 2, S. 2349-2358, DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.187.
- [35] Zirwes, T.; Vignat, G.; Toro, E. R.; Boigné, E.; Younes, K.; Dimosthenis, T.; Ihme, M.: Improving volume-averaged simulations of matrix-stabilized combustion through direct X-ray  $\mu$ CT characterization: Application to  $\text{NH}_3/\text{H}_2$ -air combustion. *Combust. Flame* 257 (2023) S. 113020, DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.113020.
- Beiträge auf Konferenzen und Berichte**
- [36] Bauer, M.; Hagen, F. P.; Kretzler, D.; Schulz, S.; Stelzner, B.; Bockhorn, H.; Suntz, R.; Trimis, D.: Linking carbon nanostructure, optical properties, volume fraction, and size distribution of carbon nanoparticles formed in premixed flames. 31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, Technische Universität Berlin, Germany, September 27-28, 2023.
- [37] Braig, D.; Fedoryk, M. A.; Mich, J.; Harth, S. R.; Stelzner, B.; Scholtissek, A.; Trimis, D.; Hasse, C.: Combustion characteristics of iron-air suspensions: reaction zone structures and reaction front speed. 31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, Technische Universität Berlin, Germany, September 27-28, 2023.
- [38] Fedoryk, M.; Stelzner, B.; Harth, S.; Trimis, D.: Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit von Eisenstaub-Luft Flammen. Jahrestreffen der DECHEMA Fachgruppe Hochtemperaturtechnik, Karlsruhe, Deutschland, 28.-29. März, 2023.
- [39] Fedoryk, M.; Stelzner, B.; Harth, S.; Trimis, D.: Laminar burning velocity measurements and stability map determination of Fe-N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures in a tube burner. *Proc. 11<sup>th</sup> European Combustion Meeting - 2023*, (2023), S. 440608, April 26-28, Rouen, France.
- [40] Kaiser, T. L.; Varillon, G.; Polifke, W.; Zhang, F.; Zirwes, T.; Bockhorn, H.; Oberleithner, K.: Using a linear active-flame analysis to model the response of a turbulent jet flame to acoustic excitation. *GAMM - 93<sup>rd</sup> Annual Meeting*, (2023).
- [41] Kaiser, T. L.; von Saldern, Jakob G. R.; Goldack, M.; Polifke, W.; Varillon, G.; Zhang, F.; Zirwes, T.; Bockhorn, H.; Oberleithner, K.: On the significance of modeling turbulent transport when linearizing the governing equations of a turbulent Bunsen flame. *Symposium on Thermoacoustics in Combustion: Industry meets Academia (SoTiC 2023)*, (2023), 11-14 September 2023, ETH Zürich, Zürich, Switzerland.
- [42] Luu, T. D.; Shamooni, A.; Kronenburg, A.; Braig, D.; Mich, J.; Nguyen, B.; Scholtissek, A.; Hasse, C.; Thäter, G.; Carbone, M.; Frohnapfel, B.; Stein, O. T.: Carrier-phase DNS of micron-sized iron particles in a turbulent reacting mixing layer. 31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, (2023), S. 1-10, Technische Universität Berlin, Germany.
- [43] Schlinger, P.; Jazkow, W.; Weis, C.; Habisreuther, P.; Stelzner, B.; Trimis, D.: Experimental determination of the laminar burning velocity of methane-oxygen-flames stabilized with cylindrical burners at various preheating temperatures. *Proc. 11<sup>th</sup> European Combustion Meeting*, (2023), S. 440679, April 26-28, Rouen, France.
- [44] Schneider, M.; Bauer, M.; Habisreuther, P.; Weis, C.; Stelzner, B.; Trimis, D.: Investigation of the laminar burning velocity of premixed H<sub>2</sub>-air flames highly diluted with exhaust gas using the heat-flux burner method. *Proc. 11<sup>th</sup> European Combustion Meeting - 2023*, (2023), S. 440670, April 26-28, Rouen, France.
- [45] Schneider, M.; Bauer, M.; Schulz, S.; Habisreuther, P.; Weis, C.; Stelzner, B.; Trimis, D.: Development of a model burner for turbulent premixed hydrogen-air combustion at high exhaust gas recirculation (EGR) rates. 31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, (2023), S. 1-11, Technische Universität Berlin, Germany.
- [46] Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Oxidation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Evidence of Similarities in Thermochemical Properties and Reaction Paths. *Proceeding of the 12<sup>th</sup> Mediterranean Combustion Symposium*, (2023), January 23-26, Luxor, Egypt.
- [47] Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: A Numerical Investigation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Reactions with Oxygen: Thermochemistry and kinetics similarities. *Proc. 11<sup>th</sup> European Combustion Meeting - 2023*, (2023), S. 436005, April 26-28, Rouen, France.
- [48] Thäter, G.; Carbone, M.; Venugopal, V.; Luu, T. D.; Stein, O. T.; Frohnapfel, B.: The influence of turbulence on micron-sized iron particle combustion. 31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, (2023), S. 1-10, Technische Universität Berlin, Germany.
- [49] Weis, C.; Sentko, M.; Stelzner, B.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Trimis, D.: Experimental and numerical investigations of the laminar burning velocities of premixed fuel-rich methane oxy-fuel and oxygen-enhanced flames. *4<sup>th</sup> Oxyflame Workshop*, Naples, Italy, 23<sup>rd</sup> March, 2023.
- [50] Weis, C.; Habisreuther, P.; Athenstädt, C.; Wahl, E.; Trimis, D.: Simulation eines industriellen Brenners zur thermischen Nachverbrennung mit Lösemittel beladener Luft hinsichtlich der Brenngassubstitution von Erdgas durch Wasserstoff. *Jahrestreffen der DECHEMA Fachgruppe Hochtemperaturtechnik*, Karlsruhe, Deutschland, 28.-29. März, 2023.
- [51] Zhang, F.; Cao, J.; Zirwes, T.; Netsch, N.; Tavakkol, S.; Zhang, R.; Bockhorn, H.; Stapf, D.: Numerical simulation of thermal decomposition of polyethylene with a single-particle model. *14. International Conference on Computational Heat and Mass Transfer (ICCHMT)*, (2023), Düsseldorf, Germany, 4-8 Sept.
- [52] Zirwes, T.; Zhang, F.; Kaiser, T. L.; Eckart, S.; Oberleithner, K.; Stein, O. T.; Bockhorn, H.: Dreidimensionale Effekte in der lokalen und globalen Struktur thermo-diffusiver Instabilitäten in vorgemischten Wasserstoffflammen. 31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, Technische Universität Berlin, Germany, September 27-28, 2023.
- [53] Zirwes, T.; Zhang, F.; Kaiser, T. L.; Eckart, S.; Oberleithner, K.; Stein, O. T.; Bockhorn, H.: Three-dimensional effects on the local and global structure of thermo-diffusive instabilities in premixed hydrogen flames. 31. Deutscher Flammentag für nachhaltige Verbrennung, (2023), S. 1-10, Technische Universität Berlin, Germany.

### 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

Auch im Jahr 2023 konnten wieder verschiedene Projekte am Lehrstuhl und an der DVGW-Forschungsstelle abgeschlossen und auch weitere neue Projekte eingeworben werden.

Das EU-Projekt „ESI-CorA – Pilotbetrieb zum Corona-Abwassermonitoring“ wurde im März abgeschlossen. Bei einer öffentlichen Abschlussveranstaltung im März 2023 in Karlsruhe haben die Projektbeteiligten (Koordination: KIT-Projektträger Karlsruhe (PTKA); Projektpartner: Robert-Koch-Institut, Umweltbundesamt, Technische Universität Darmstadt, sowie Teilprojekt von EBI) ihre vorläufigen Ergebnisse vorgestellt. Das Abwassermonitoring ist ein hilfreiches Werkzeug zur Lagebewertung, da es die Entwicklung konkreter Vorsorge- und Schutzmaßnahmen auf lokaler und auch auf Landes- und Bundesebene abbildet ([https://www.ptka.kit.edu/img/ESI-CorA\\_Bericht\\_final.pdf](https://www.ptka.kit.edu/img/ESI-CorA_Bericht_final.pdf)).

Das Verbundprojekt „Kontinuierliche Bioproduktion mit maßgeschneiderten Biokatalysatoren in bioelektrochemischen Fermentern (ContiBio-Elect)“ konnte im Jahr 2023 abgeschlossen werden. Im Projekt wurde ein Prototyp eines bioelektrochemischen Reaktors entwickelt, der als Festbett mit einem hohen Elektrodenoberfläche-zu-Volumen-Verhältnis ausgestaltet wurde und sowohl für anodische als auch für kathodische Umsetzungen eingesetzt werden kann. Bei hohem Biomasseanfall ist eine Fluidisierung des Schüttguts und damit ein Austrag überschüssiger Biomasse realisierbar. Neben der Nutzung als Biofilmreaktor mit direktem Elektronentransfer ist auch eine Nutzung für Prozesse mit vermitteltem Elektronentransfer denkbar.

Ebenfalls abgeschlossen wurde das Verbundprojekt „Komplettaufbereitung von Gülle und Gärresten unter Berücksichtigung regionaler Stoffstromkonzepte für Nähr- und Schadstoffe (KompaGG-N)“. Das vorgeschlagene Verfahrenskonzept kann Ammoniak zur Verfügung stellen und zeigt Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung auf. Die Ergebnisse zeigen, dass Membranfiltrationsprozesse wie Mikrofiltration und Ultrafiltration nährstoffreiche, partikel- und pathogenfreie Ströme aus Schweinegülle mit vergleichsweise niedrigen Betriebs- und Wartungskosten erzeugen können. Membranfiltrationsprozesse können auch Antibiotikaresistenzgene effektiv entfernen und das Abfallvolumen reduzieren, indem ein stickstoffreiches Konzentrat als Dünger erzeugt wird.

Ein Highlight des Projektes „PeePower<sup>TM1</sup> BUGA 2023“ war der Pilotanlagenreaktor zur mikrobiell katalysierten Wasser-

stofferzeugung aus Urin auf der Bundesgartenschau (BUGA 2023; [https://www.youtube.com/watch?v=PEIKz\\_JOVE4](https://www.youtube.com/watch?v=PEIKz_JOVE4)). Der Reaktor war fast sechs Monate lang unter realen Bedingungen in Betrieb. Prof. Harald Horn stellte ergänzend auf der Messe „Future of Festivals“ das Konzept des PeePower<sup>TM</sup>-Reaktors in Berlin vor. Bei einer Podiumsdiskussion („Pee & Poo Power“) ging es um alternative nachhaltige Sanitärkonzepte (<https://youtu.be/BT3uN8YdedQ>).

Im Rahmen des Projekts „KoalAplan“ fand im Juli 2023 ein Statustreffen mit Vertretern des Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz und Energiewirtschaft Baden-Württemberg statt. Auf dem Lehr- und Forschungsklärwerk der Universität Stuttgart in Bismarck werden verschiedene Pilotreaktoren betrieben, um Stickstoff, Wasserstoff und Bioplastik aus Abwasser zu gewinnen. Eine ausführlichere Projektdarstellung finden Sie auf den folgenden Seiten.

An der DVGW-Forschungsstelle sind neue Forschungsprojekte zu den Themen „Biologisch aufbereitetes Abwasser für die Wasserstoff-Elektrolyse“ und „Biofilmbildung in Umkehrosmosemembranen“ angelaufen.

Auf den nächsten Seiten finden Sie zwei ausführlichere Berichte zu Projekten im Themenfeld „Wasseraufbereitung“ und „Biologische Grenzflächen“ sowie zwei Übersichten zu abgeschlossenen Promotionsarbeiten. Die **Tabelle 3.1** zeigt ebenfalls alle Projekte, die im laufenden Berichtsjahr 2023 abgeschlossen, fortgeführt oder neu eingeworben wurden.

Für seine Masterarbeit wurde unser Mitarbeiter Jonas Ullmann im Jahr 2023 mit zwei Preisen ausgezeichnet. Die Arbeit „Aufbereitung von Grundwässern mit Aktivkohlefiltration am Beispiel der Wasserwerke Rauschen und Schlierbach“ wurde mit dem Studienpreis Wasser 2022/23 des DVGW e.V. für herausragende Leistungen im Themengebiet Wasser und einem Preis der Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts bedacht.

##### Lehre

Im Studiengang „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ (CIW) haben sich im WS 23/24 nur mehr 111 Bachelor- und 99 Masterstudierende immatrikuliert (WS 22/23: 132 für CIW-Bachelor). Die Zahlen im „Bioingenieurwesen“ (BIW) verzeichnen im WS 23/24 wieder einen Zuwachs, 73 Bachelor- und 18 Masterstudierende (WS 22/23: 55 BIW-Bachelor). Der englischsprachige Master-Studiengang „Water Science and Engineering“ (WSE) verzeichnet dagegen eine stetig steigende Anzahl von Bewerbungen (> 500 pro Jahr), von denen in 2023 insgesamt 25 Studierende immatrikuliert wurden.

In den Masterstudiengängen ist das Interesse der Studierenden am wasserausgelegten Profil A (Water Technologies and Urban Water Cycle) mit den Veranstaltungen „Water Technology“, „Membrane Technology in Water Treatment“, „Fundamentals of Water Quality“ und „Industrial Wastewater Treat-

<sup>1</sup> TM denotes trademark of University of West England, used under licence by University of Southampton

ment“ aber weiterhin sehr groß. Die hohe Beteiligung an den Veranstaltungen spiegelt sich auch in der großen Nachfrage an experimentellen Masterabschlussarbeiten wider. Im Jahr 2023 konnten insgesamt 21 Arbeiten abgeschlossen werden (vier Bachelorarbeiten, sechs Study-Projektarbeiten, elf Masterarbeiten).

Unsere seit vielen Jahren etablierten Freitagseminare werden jetzt regulär im Hybrid-Modus angeboten, bei dem sowohl Vortragende als auch Zuhörende entweder im Hörsaal anwesend oder online zugeschaltet sind. Der online-Modus wird verstärkt von vielen interessierten Zuhörenden angenommen.

#### Internationale Kooperationen in Forschung und Lehre

Herr Israel Larralde Pina, Doktorand an der Universidad Autónoma de Nuevo León in Mexiko, konnte im Rahmen eines Stipendiums für vier Monate Untersuchungen zur Oxidation von Arzneimitteln durch Elektro-Fenton-Reaktionen durchführen. Er nutzte seinen Aufenthalt, um mit der Flüssigkeitschromatographie gekoppelt mit der Tandem-Massenspektrometrie unterschiedliche Arzneimittel und ihre Abbauprodukte nach der Oxidation zu analysieren.

Dr. Rui Du, Humboldt-Stipendiatin, hat ihre Arbeiten zur Kombination der partiellen Denitrifikation kombiniert mit der anaeroben Ammoniumoxidation am Engler-Bunte-Institut im August 2023 abgeschlossen und ist an die Beijing University of Technology zurückgekehrt. Teile ihrer erfolgreichen Arbeiten wurden bereits veröffentlicht (Du et al., 2023, siehe auch 3.3).

Einen Teilaspekt dieser Arbeiten hat Dr. Anwar Dawas von der Tel-Aviv University, Israel, bei ihrem Kurzaufenthalt am EBI im Rahmen eines Rektor-Stipendiums fortgesetzt. Es wurden die Denitrifikationsraten von Belebtschlamm aus Kläranlagen untersucht.

Na Li, Doktorandin aus China, ist im April an ihre Heimatuniversität zurückgekehrt und hat 2023 ihre Promotionsarbeit zu Prozessen der Biofilmentwicklung und Sukzession mikrobieller Gemeinschaften in Wasserverteilungssystemen erfolgreich abgeschlossen. Ihr Aufenthalt wurde durch ein Stipendium des Chinese Scholarship Council finanziert.

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), der seit September 2022 als Gastprofessor an unserem Institut tätig war, hat seine Arbeiten im April 2023 an der Universität in Ancona in Italien fortgesetzt. 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.

Im Oktober 2023 hat Frau Nurul Faiquatul Himma aus Indonesien ihre Promotionsarbeit begonnen. Sie befasst sich mit der Membrandestillation und dem Biofouling. Die Forschungsarbeit wurde über ein Bridge-Stipendium des KIT und wird ab 2024 durch die Landesgraduiertenförderung finanziert.

Willow Neske von der Temple University arbeitet im Rahmen eines Fulbright-Stipendiums zur Thematik Abwasserwiederaufbereitung und erneuerbare Energien in Deutschland.

#### Promotionen

Im Jahr 2023 wurden zwei Promotionen fertiggestellt, im Folgenden sind die Arbeiten kurz zusammengefasst.

Im Februar verteidigte Herr M. Sc. **Giorgio Pratofiorito** seine Dissertation „Application of low-pressure reverse osmosis in a two-stage biogas production: optimization of VFA concentration and biofouling monitoring“ (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Ing. Mathias Ernst (Technische Universität Hamburg)). Im Rahmen seiner Arbeit hat er sich mit der Aufbereitung von Feedströmen aus der sauren Hydrolyse mit Membranverfahren beschäftigt. Die generelle Idee ist, dass das mit organischen Säuren angereicherte Permeat im Anschluss beispielsweise in einer Hochdruckfermentation mit Festbett eingesetzt werden kann. Dies ermöglicht sehr hohe Raum-Zeit-Ausbeuten und kann durch die Eigenleistung der anaeroben Mikroorganismen das produzierte Biogas mit hohem Druck bereitstellen. Von Vorteil ist es ebenfalls, dass das verbleibende Kohlenstoffdioxid zum größten Teil in der flüssigen Phase verbleibt. Ein solches Reaktionssystem wurde bereits im Pilotmaßstab realisiert.

Typischerweise wird für die Aufreinigung zunächst eine keramische Mikrofiltration (MF) verwendet. In einem weiteren Schritt hat Herr Pratofiorito eine Niederdruck-Umkehrosmose (LPRO, Low Pressure Reverse Osmosis, FilmTec XLE) vorgesehen. Die optimale Betriebsweise für die XLE-Membran wurde am Beispiel von Essigsäure als Modellschubstanz in einer Salzlösung ermittelt, was eine reale Hydrolysat-Lösung abbildet. Die Versuche bei 22 und 25 bar wurden in Flachzellen durchgeführt. Herr Pratofiorito kann die Trennleistung der Membran anhand eines Konzentrationsfaktors abbilden, der über das Verhältnis von Feed- und Konzentratstrom berechnet wird. Die Effizienz der Essigsäureabtrennung sinkt oberhalb eines Rückhalts von 33 % bei 22 bar und bei 25 bar oberhalb eines Rückhalts von 44 %. Herr Pratofiorito konnte zeigen, dass mit steigender Essigsäurekonzentration auf der Feedseite tatsächlich der Durchbruch durch die Membran ansteigt.

Im Hinblick auf das Foulingverhalten bei Feedströmen mit sehr hohen Konzentrationen an organischem Kohlenstoff differenziert Herr Pratofiorito im vierten Abschnitt seiner Arbeit den Einfluss von Spacer- und Membranfouling auf die Gesamtleistung der LPRO. Mit Hilfe der optischen Kohärenztomographie (OCT) kann das Fouling sowohl auf den Spacern als auch auf der Membran über einen Zeitraum von vier Wochen kontinuierlich beobachtet und aufgezeichnet werden. Dazu hat Herr Pratofiorito ein Werkzeug für die Auswertung der Bilddaten entwickelt, das die Differenzierung von Biofouling auf dem Spacer und der Membran ermöglicht. Er konnte zeigen, dass zunächst die Spacer bewachsen werden, was nicht zu einem Abfall der Permeabilität führt, aber einen Einfluss auf den Druckverlust im Feedkanal hat.

Der Permeatstrom nimmt erst ab, wenn sich nach 14 Tagen eine Foulingschicht auf der Membran bildet.

In einem weiteren Teil der Arbeit beschäftigte sich Herr Prato Fiorito mit der Möglichkeit, Fouling mit einem Sensor zu erfassen, der ein möglichst einfaches Messprinzip (Wärmeübergang) hat. Tatsächlich können Beläge auf wärmeleitfähigen Oberflächen mit Hilfe des sich verändernden Wärmedurchgangs detektiert werden. Solche Sensoren werden von der Firma Lagotec GmbH aus Magdeburg seit mehr als zehn Jahren am Markt vertrieben. Da eine RO-Membran typischerweise nicht für den Einsatz des Sensors geeignet ist, hat Herr Prato Fiorito erfolgreich versucht, die Bildung der Biofoulingschicht auf einer unter vergleichbaren Bedingungen betriebenen Fließzelle mit metallischer wärmeleitender Oberfläche abzubilden. Dazu wurden zwei Flachzellenmodule mit optischen Fenstern parallel mit einer Fließzelle mit Metalloberfläche und integriertem Wärmeleitfähigkeitssensor in mehreren Experimenten über Zeiträume von bis zu 14 Tagen betrieben. In allen Zellen konnte der Aufwuchs mit Hilfe der OCT-Technik detektiert werden. Damit gelang eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Tatsächlich findet auf der angerauten Metalloberfläche ein Biofilmaufwuchs statt, der so auch auf den Membranen detektiert werden kann. Darüber hinaus korreliert das Sensorsignal an der Metalloberfläche sehr gut mit dem OCT-Signal und, viel wichtiger, mit dem Verlust an Permeabilität. Zum Schluss zeigte Herr Prato Fiorito, dass auch ein Reinigungsschritt mit der Abnahme des Sensorsignals (Minimierung der Biofilmdicke) und Wiederanstieg des Permeatstroms abgebildet werden kann.

Die Ergebnisse lassen durchaus erwarten, dass ein solches Detektionssystem mittelfristig für Betreiber von Membrananlagen attraktiv werden kann.

Die Arbeit ist im Jahr 2024 in der Schriftenreihe Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erschienen und ist über das Sekretariat des Lehrstuhls erhältlich (Band 88).

Im Dezember verteidigte Frau M. Sc. **Amélie Chabilan** ihre Dissertation „Bestimmung von Antibiotika und ihr Verbleib zwischen der Wasser- und Sedimentphase“ (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Stefan Stolte (Technische Universität Dresden)).

In der Regel werden pharmazeutische Wirkstoffe in der aquatischen Umwelt in der Flüssigphase gemessen. Eine Betrachtung der Konzentrationen in der Sedimentphase ist weniger häufig zu finden, was unstrittig an der aufwendigen Analytik in und an der festen Phase liegt. Frau Chabilan hat in ihrer Doktorarbeit zentral an der Frage des Verbleibs von Humanantibiotika (Sulfonamide, Makrolide, Tetracycline, Fluorchinolone) zwischen Wasser- und Sedimentphase gearbeitet.

Die Verteilung zwischen der Wasserphase und dem Sediment ist in Realsystemen (Fluss, See) wegen der schwierigen Randbedingungen nur unzureichend genau aufzuklären. Vor allem ist die Quantifizierung der Antibiotika im Sediment analytisch eine Herausforderung.

Ein wichtiger Teil der Arbeit von Frau Chabilan befasst sich mit der Bestimmung von 19 verschiedenen Antibiotika aus wässrigen Proben mit einer Festphasenextraktion (SPE) zur Anreicherung und dann zur Quantifizierung mit der LC-MS/MS. Für die Sedimentproben wird die beschleunigte Lösungsmittelextraktion (PLE, Pressurized Liquid Extraction) verwendet. Hier wurde für die Doktorarbeit sehr viel investiert, um ein optimales Protokoll zu bekommen, mit dem eine hohe Wiederfindung der Antibiotika im Sediment garantiert werden kann. Arbeitstechnisch hat das nahezu ein Jahr in Anspruch genommen. Die Ergebnisse sind für die Wasseranalytik äußerst wichtig, da sie die Limitierung der Spurenanalytik im Bereich der Feststoffe offenlegt. Frau Chabilan kann die Wiederfindung der einzelnen Antibiotika in der Festphase sehr schön mit ihren  $\log K_{OW}$  korrelieren. Typischerweise wurde bisher die Einteilung der Antibiotika bei der Analytik nach den oben genannten Gruppen (Sulfonamide, Makrolide, Tetracycline, Fluorchinolone) vorgenommen. Es erscheint auf der Basis der vorgelegten Ergebnisse sinnvoll, die Gruppierung eher auf der Basis physikalisch-chemischer Eigenschaften vorzunehmen.

Das Hauptergebnis der Doktorarbeit von Frau Chabilan ergibt sich aus den durchgeführten Versuchen in sogenannten Mesokosmen, die annähernd die Verhältnisse zwischen Wasser und Sediment abbilden sollen. Solche Versuche im Labor ermöglichen es, dass die oben genannten Randbedingungen (Temperatur, Beleuchtung, Durchmischung) fest definiert werden können. Dadurch konnte Frau Chabilan vier verschiedene Reaktoren mit jeweils 10 L Volumen betreiben, in denen die Prozesse biologischer Abbau, Photolyse, Adsorption und Hydrolyse ausdifferenziert und der Abbau für die 19 Antibiotika quantifiziert werden konnten. Für alle Prozesse konnten Reaktionskonstanten erster Ordnung bzw. Halbwertszeiten bestimmt werden. Die Adsorption ist bei den Tetracyclinen und Fluorchinolonen dominant, während die Sulfonamide weitestgehend einem biologischen Abbau zugeführt werden. Die Makrolide sind offensichtlich nicht gut abbaubar und verbleiben in der Wasserphase.

Im letzten Ergebnisteil der Doktorarbeit werden noch Resultate von Messungen in der Alb (einem Mittelgebirgsfluss) dargestellt. Tatsächlich finden sich in erster Linie die gut adsorbierbaren Tetracycline und Fluorchinolone im Sediment wieder. In der Tat sind die gefundenen Konzentrationen im Sediment der Alb mit denen der Mesokosmenversuche vergleichbar. Dies kann zumindest für die Antibiotika gezeigt werden, deren Konzentration im Sediment im Bereich von einigen  $\mu\text{g}/\text{kg}$  lag.

Die Arbeit wird im Jahr 2024 in der Schriftenreihe Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erscheinen und ist über das Sekretariat des Lehrstuhls erhältlich (Band 90).

**Tabelle 3.1:** In Arbeit befindliche, im Jahr 2023 abgeschlossene\* und neu begonnene Forschungsprojekte.

| Schwerpunkt            | Projektmitarbeitende   | Thema  | Förderung   |
|------------------------|--|--|---|
| Wasser-<br>qualität    | Steffen Hertle<br>(externer Doktorand)   | Aerob metabolischer Chlorethenabbau in kontaminiertem Grundwasser  | DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW)  |
|                        | Lucas Lesmeister<br>(externer Doktorand)   | Aufbereitungsverfahren zur Entfernung kurzkettiger per- und polyfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) aus Trinkwasser und Membrankonzentraten   | TZW   |
|                        | Ulrike Scherer<br>Harald Horn  | Systematische Überwachung von SARS-CoV-2 im Abwasser (ESI-Cora; Verbundprojekt) *  | Europäische Union, Soforthilfeinstrument ESI (Emergency Support Instrument)                       |
|                        | Tim Schwarzenberger<br>(externer Doktorand)  | Verifizierung und Optimierung eines kombiniert variablen Ansatzes zur mikrobiologischen Validierung von mono- und polychromatischen UV-Systemen  | TZW   |
|                        | Stephan Zimmermann   | Verhalten von Krebsmedikamenten bei Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung  | Karlsruher Institut für Technologie (KIT)   |
| Wasser-<br>technologie | Mehran Aliaskari<br>Yair Morales<br>Sophie Oepling<br>Prantik Samanta<br>Vasco Welter<br>Florencia Saravia<br>Michael Wagner | PtX-Wind – Offshore Power-to-X-Prozesse, Technologieplattform H <sub>2</sub> Mare (Verbundprojekt)   | Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  |
|                        | Yair Morales<br>Florencia Saravia  | Transferwind-H <sub>2</sub> Mare – Forschungs-Transfer, Technologieplattform H <sub>2</sub> Mare (Verbundprojekt)  | BMBF  |
|                        | Nurul Faiqotul Himma<br>Florencia Saravia  | Membrandestillation – Fouling und Benetzung von Membranen  | Bridge-Stipendium des KIT   |
|                        | Andreas Netsch<br>Michael Wagner   | Entwicklung und Demonstration einer energieeffizienten bioelektrochemischen Abwasserbehandlung im technischen Maßstab mit Einhaltung gesetzlicher Anforderungen zur Ablaufqualität (Demo-BioBZ; Verbundprojekt)                        | BMBF  |
|                        | Giorgio Pratofiorito<br>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<br>Florencia Saravia   | Komplettaufbereitung von Gülle und Gärresten unter Berücksichtigung regionaler Stoffstromkonzepte für Nähr- und Schadstoffe (KompaGG-N; Verbundprojekt)  | BMBF  |
|                        | Florencia Saravia  | Entwicklung eines Überwachungssystems für eine effiziente Erkennung von Biofouling in Umkehrosmoseanlagen  | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) |
|                        | Jan Singer<br>Yair Morales<br>Florencia Saravia  | Ermittlung von Rahmenbedingungen für die Nutzung von biologisch gereinigtem Abwasser für die Wasserstoffelektrolyse – Anforderungen für die weitergehende Aufbereitung, Anfall und Behandlung von Abwasserströmen (KA4H <sub>2</sub> ) | Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg                             |
|                        | Jonas Ullmann<br>Max Hackbarth<br>Jochen Wezstein  | Einsatz einer mikrobiellen Elektrolysezelle auf Basis eines Scheibentauchkörpers zur nachhaltigen Wasserstoffproduktion aus Urin auf der BUGA 2023 (PeePower™; Verbundprojekt)   | Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; KIT                        |

| Schwerpunkt                   | Projektmitarbeitende   | Thema  | Förderung  |
|-------------------------------|--|--|--|
| Biologische Abwasserreinigung | Israel Larralde Pina<br>Harald Horn  | Oxidation von Arzneimitteln durch Elektro-Fenton-Reaktionen *  | Stipendium der Universidad Autónoma de Nuevo León, México  |
|                               | Willow Neske<br>Andrea Hille-Reichel   | Abwasserwiederaufbereitung und erneuerbare Energie in Deutschland  | Fulbright-Stipendium, Temple University; KIT   |
|                               | Nikhil Shylaja Prakash<br>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; KIT   |
|                               | Anwar Dawas  | Partielle Denitrifikation  | Rektor-Stipendium, Tel-Aviv University, Israel   |
|                               | Rui Du   | Kombination anaerober Ammoniumoxidation (Anammox) und partieller Denitrifikation in Biofilmverfahren *   | Alexander von Humboldt Stiftung; KIT   |
|                               | Süheyla Duran<br>Andrea Hille-Reichel  | Anwendung von Membranbiofilmreaktoren für die biotechnologische Produktion von Plattformchemikalien  | Stipendium, The Republic of Türkiye Ministry of National Education; KIT  |
|                               | Na Li<br>Harald Horn   | Prozess der Biofilmentwicklung und Sukzession mikrobieller Gemeinschaften in Wasserverteilungssystemen *   | Chinese Scholarship Council (CSC); KIT   |
|                               | Max Miehle<br>Andrea Hille-Reichel   | Kontinuierliche Bioproduktion mit maßgeschneiderten Biokatalysatoren in bioelektrochemischen Fermentern (ContiBio-Elect; Verbundprojekt) *         | BMBF   |
|                               | Johannes Reiner<br>Zhizhao Xiao<br>Max Hackbarth<br>Andreas Netsch<br>Andrea Hille-Reichel | Reaktionskaskaden zur Produktion von Biopolymeren aus Abfallstoffströmen (BROWSE; Verbundprojekt)  | BMBF   |
|                               | Isam Sabbah  | Nano- und Mikroplastik in aquatischen Systemen; Prozessmodellierung; Wasser- und Abwasserbehandlung *  | Sabbatical am EBI, KIT; BRAUDE College of Engineering, Karmiel, Israel   |

### 3.2 In Arbeit befindliche, im Jahre 2023 abgeschlossene\* und neu begonnene Forschungsprojekte

Die 2023 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 der Thematik der Kreislaufwirtschaft und der Ressourcengewinnung in Kläranlagen und der Überwachung von Biofouling auf Membranoberflächen.

#### Verwertung von organischem Kohlenstoff aus Primärschlamm durch Dunkelfermentation: Erster Schritt zum Aufbau einer Abwasser-Bioraffinerie



Baden-Württemberg



Kofinanziert von der Europäischen Union

**Nikhil Shylaja Prakash,  
Andrea Hille-Reichel**  
Förderung: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, kofinanziert von der Europäischen Union (Bioök\_2076393)

Mit dem wachsenden Interesse an der Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft werden Kläranlagen nicht mehr nur als Schadstoffentfernungsstufe betrachtet, sondern vielmehr als Einheit zur Ressourcengewinnung. Organischer Kohlenstoff ist eine solche Schadstoffbelastung, deren Potenzial in der kommunalen Abwasserreinigung in der Regel in Form der Produktion von Biogas genutzt wird. Obwohl diese Verwertung etabliert und Stand der Technik ist, legt das Ziel der nachhaltigen Nut-

zung vorhandener Ressourcen insbesondere vor dem Hintergrund des erheblichen Anstiegs des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks weltweit eine effizientere Nutzung des organischen Kohlenstoffs nahe. In einer konventionellen Kläranlage werden etwa 30 % der organischen Fracht (angegeben als chemischer Sauerstoffbedarf) in der aeroben Belebungsstufe zu CO<sub>2</sub> oxidiert, weitere 33 % werden in der anaeroben Gärung in Biogas umgewandelt (60 % CH<sub>4</sub> und 40 % CO<sub>2</sub>) [1]. Einen gut abtrennbaren und konzentrierten Stoffstrom stellt dabei der partikuläre Anteil des Abwassers dar. Etwa 70 % des Schlammanfalls in einer Kläranlage sind Primärschlamm, daher ist eine Nutzung dieses großen Anteils organischer Fracht ein wesentlicher Schritt bei der Errichtung einer Abwasser-Bioraffinerie. Sauberer Brennstoff wie Wasserstoff und biologisch abbaubare Kunststoffe sind potenzielle Produkte, die durch eine entsprechende Aufwertung und Umwandlung des organischen Kohlenstoffs gewonnen werden könnten. Beide Produkte erfordern organische Säuren als Vorläufer, welche in einer Dunkelfermentation (anaerobe Hydrolyse) produziert werden können. Nach Da Ros et al. [2] könnte der durch Ressourcenwiedergewinnung erzielbare Nettoumsatz ungefähr verdoppelt werden, wenn die organischen Säuren zur PHA-Produktion (Polyhydroxyalkanoate, als Basis für die Produktion von Biokunststoffen) und zur biologischen Nährstoffentfernung genutzt würden.

In der hier vorgestellten Studie wurden Versuche von Labor bis Pilotmaßstab durchgeführt, um die Produktion von kurzkettigen Fettsäuren (SCFAs, short chain fatty acids) aus Primärschlamm zu optimieren. In Batch-Tests konnte gezeigt werden, dass bereits nach kurzen Fermentationszeiten hohe Umsatzleistungen zu erreichen waren. Untersuchungen im halbkontinuierlichen Betriebsmodus ergaben die maximale Produktivität bei einer hydraulischen Verweilzeit (HRT, hydraulic retention time) von 36 Stunden. Hier wurde nur eine minimale Methanisierung des organischen Kohlenstoffs festgestellt, was darauf zurückzuführen ist, dass kurze Verweilzeiten einen Selektionsvorteil der acidogenen Bakterien gegenüber den langsamer wachsenden methanogenen Archaeen darstellen. Bei dieser optimalen Verweilzeit von 36 Stunden wurde daraufhin auch der Einfluss des pH-Wertes (in einem Bereich von pH 5 bis pH 10) bei halbkontinuierlichem Betrieb auf die Dunkelfermentation untersucht (Bild 3.1).

Es zeigte sich, dass die höchsten Ausbeuten an kurzkettigen Fettsäuren bei pH 7 erzielt werden konnten, da im neutralen pH-Wert-Bereich offenbar optimale Redoxbedingungen für die Fermentation geschaffen wurden. Die optimierten Kultivierungsparameter wurden schließlich auf den Pilotmaßstab mit einem Reaktorvolumen von 300 L übertragen. Im Vergleich zu einer Betriebstemperatur von 22 bis 25 °C zeigten Experimente bei einer Temperaturerhöhung auf 32 °C, dass die tägliche Produktivität von kurzkettigen Fettsäuren mit 3,1 g/(L·d) (SCFAs pro L Reaktorvolumen und Tag (HRT)) bei Ausbeuten von 150 mg/g<sub>VS</sub> (mg SCFA pro g<sub>VS</sub>, flüchtige Feststoffe (volatile solids)) signifikant verbessert

werden konnte, insbesondere für Essig- und Propionsäure (siehe Bild 3.1 und Bild 3.2). Die organische Beladungsrate (OLR, organic loading rate) betrug 21 g<sub>VS</sub>/(L·d) (Details siehe [3]).

Bild 3.2 zeigt außerdem die Gesamtbilanz des organischen Kohlenstoffs in der Dunkelfermentation des Primärschlammes. Danach werden 6 % des im Abwasser insgesamt verfügbaren Kohlenstoffs als kurzkettige Fettsäuren zurückgewonnen, dies entspricht 15 % des im Primärschlamm enthaltenen Kohlenstoffs. Die Kombination aus einer derartigen Dunkelfermentation mit einer nachfolgenden Membranfiltration zur Abtrennung der verbleibenden Feststoffe und Extraktion der kurzkettigen Fettsäuren (Publikation ist in Vorbereitung) könnte durchaus eine sinnvolle Basis für eine zukunftsorientierte und gesteigerte Wertschöpfung im Rahmen einer Abwasser-Bioraffinerie sein.

- [1] Wan, J.; Gu, J.; Zhao, Q.; Liu, Y.: COD capture: A feasible option towards energy self-sufficient domestic wastewater treatment. *Scientific Reports* 6 (1) (2016) 25054, DOI: 10.1038/srep25054.
- [2] Da Ros, C.; Conca, V.; Eusebi, A.L.; Frison, N.; Fatone, F.: Sieving of municipal wastewater and recovery of bio-based volatile fatty acids at pilot scale. *Water Research* 174 (2020) 115633, DOI: 10.1016/j.watres.2020.115633.
- [3] Prakash, N.S.; Maurer, P.; Horn, H.; Hille-Reichel, A.: Valorization of organic carbon in primary sludge via semi-continuous dark fermentation: First step to establish a wastewater biorefinery. *Bioresource Technology* 397 (2024) 130467, DOI: 10.1016/j.biortech.2024.130467.w

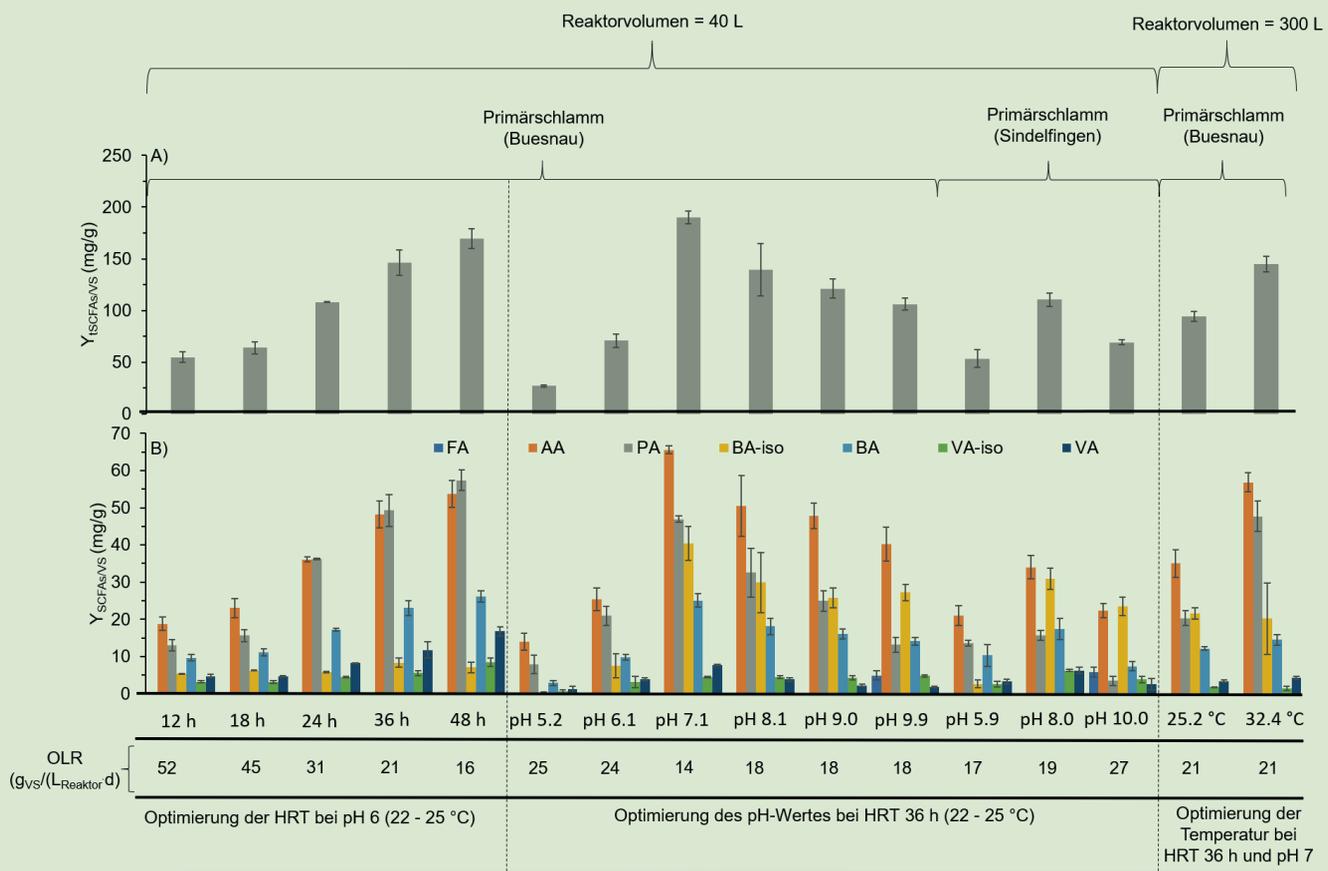
## Entwicklung eines Überwachungssystems für eine effiziente Erkennung von Biofouling in Umkehrosmoseanlagen

Szilárd Búcs, Florencia Saravia  
Förderung: Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts; Karlsruher Institut für Technologie

Ein großes Problem bei der Anwendung von Membranverfahren in der Praxis ist die Ausbildung reversibler und irreversibler Deckschichten (Fouling) während der Filtration. Die Bildung von Fouling hat einen direkten negativen Einfluss auf die Permeabilität und die Salzdurchlässigkeit der Membranen. Durch eine verringerte Kapazität der Membranen, einen erhöhten Energiebedarf für Pumpen in der Anlage, notwendige Reinigungsprotokolle und ein häufigeres Wechseln der Membranelemente ergeben sich deutlich höhere Betriebskosten für Umkehrosmose (RO)-Anlagen.

Ziel der Untersuchungen ist es daher, ein effizientes Überwachungssystem zu entwickeln, das in der Lage ist, in Echtzeit Biofouling während des RO-Prozesses zu erkennen.

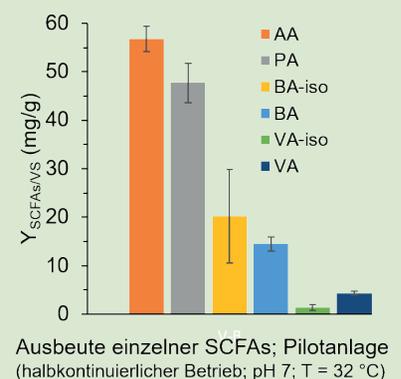
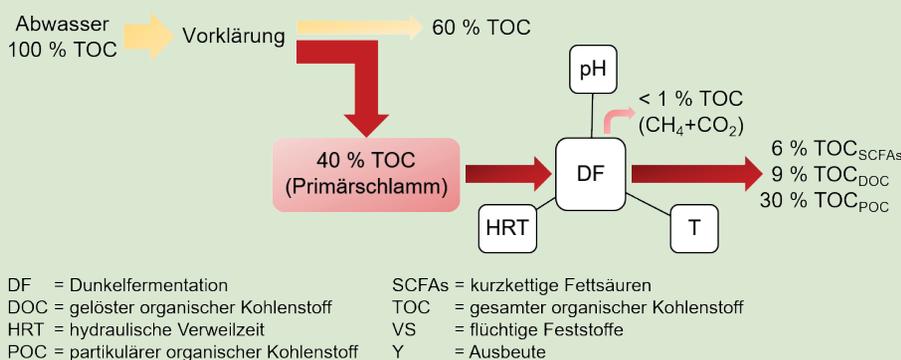
Die Entwicklung der Online-Überwachung der Biofilmbildung wird in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Lagotec GmbH (Deutschland) durchgeführt. Das Prinzip der Messung dieses Sensors beruht auf der Abschwächung des Wärmeübergangs an einer metallischen Oberfläche, die durch die Bildung von Ablagerungen hervorgerufen wird [4].



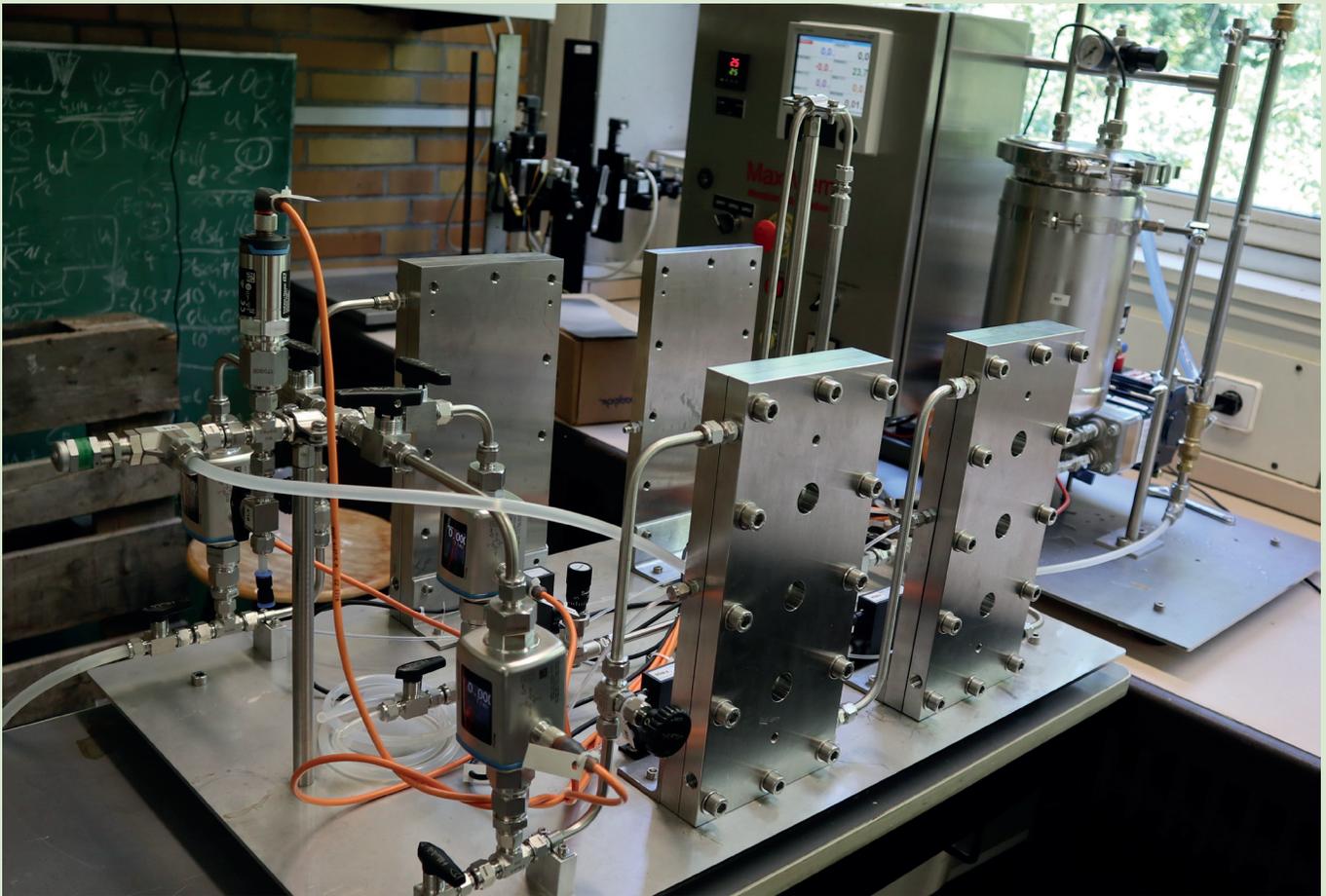
**Bild 3.1:** Ausbeute an A) gesamten (tSCFAs) und B) einzelnen kurzkettigen Fettsäuren (SCFAs, short chain fatty acids). OLR = organische Beladungsrate; HRT = hydraulische Verweilzeit; VS = flüchtige Feststoffe; FA = Ameisensäure; AA = Essigsäure; PA = Propionsäure; BA-iso = Isobuttersäure; BA = Buttersäure; VA-iso = Isovaleriansäure; VA = Valeriansäure.

Verschiedene Oberflächenmodifizierungen und Materialien werden zur Anhaftung des Biofilms untersucht. Erste Untersuchungen wurden mit Materialien mit verschiedenen Rauigkeiten durchgeführt. Der Sensor wurde in eine Zelle integriert, die den Kanal eines Wickelmoduls wiedergibt. Dies gewährleistet die Aus-

bildung von Strömungsbedingungen, die mit den auf der Feed-Seite der Membran entstehenden vergleichbar ist. Die Konzipierung und Konstruktion der Zelle wurden so ausgeführt, dass diese in einen Versuchstand zur Membranfiltration eingebaut werden konnte. Darüber hinaus verfügt die Zelle über optische Fenster (Bild 3.3). Diese ermöglichen



**Bild 3.2:** Gesamtbilanz des organischen Kohlenstoffs in der Dunkelfermentation des Primärschlammes. Die Methanproduktion war aufgrund der geringen hydraulischen Verweilzeit sehr gering.



**Bild 3.3:** Membrananlage mit Zelle und Anlegesensor, die den Feed-Kanal wiedergibt.

den Einsatz der optischen Kohärenztomographie (OCT) für das Monitoring der Messoberfläche des Sensors.

**Bild 3.4** zeigt die Ergebnisse eines Versuchs an der Membrananlage. Dabei wurde das Sensorsignal mit der Abnahme der Permeabilität verglichen. Der Versuch wurde bei 25 bar, 37 °C und mit einer Fließgeschwindigkeit von 12 cm/s oberhalb des Sensors durchgeführt. Biofilm entwickelte sich gleichzeitig und in ähnlicher Weise auf der Membran und auf dem Sensor. Zudem steigt das Sensorsignal parallel zur Abnahme der Permeabilität (eine detaillierte Ausführung ist bei Pratofiorito et al. [5] zu finden).

Die Ergebnisse zeigen, dass Biofilmsensoren eine gute Möglichkeit für die Überwachung und für die Kontrolle von Biofouling in RO-Anlagen darstellen. So können spezifische Reinigungsprotokolle an die vom Sensor gelieferten Daten angepasst werden.

Weitere Untersuchungen sind für die Optimierung des Sensors, die Definition der Sensorgeometrie und die Verarbeitung der Messsignale erforderlich.

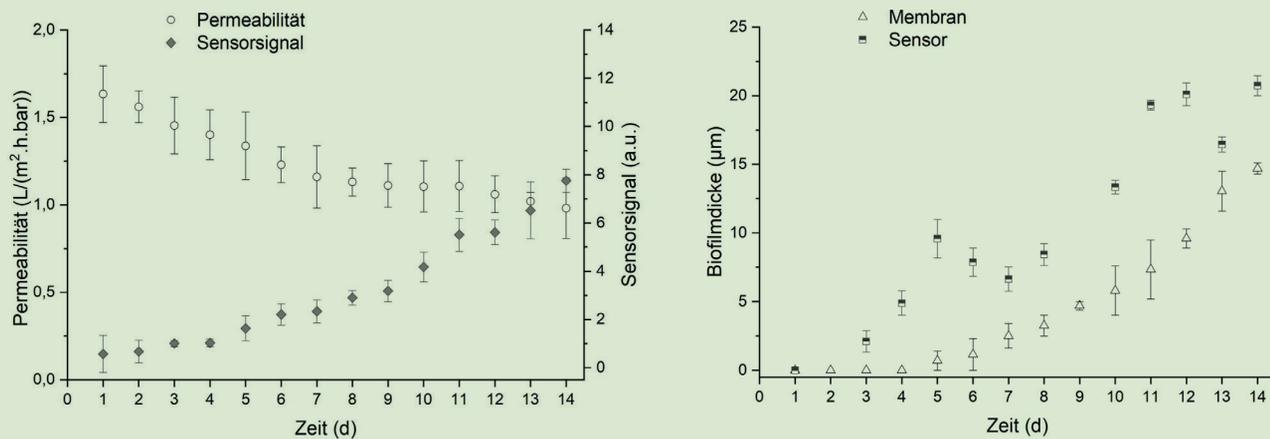
[4] Netsch, A.; Horn, H.; Wagner, M.: On-line monitoring of biofilm accumulation on graphite-polypropylene electrode material using a heat transfer sensor. *Biosensors* 12 (2022) 18, DOI: 10.3390/bios12010018.

[5] Pratofiorito, G.; Horn, H.; Saravia, F.: Application of online biofilm sensors for membrane performance assessment in high organic load reverse osmosis feed streams. *Separation and Purification Technology* 330 (2024) 125200, DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125200.

### 3.3 Veröffentlichungen

#### Veröffentlichungen in peer-reviewed Fachjournals und Buchbeiträge:

- [6] Blöcher, C.; Blesgen, A.; Engelhart, M.; Geißen, S.-U.; Horn, H.; Kozarisczuk, M.; Schließmann, U.; Track, T.: Auswirkungen der Circular Economy in der Prozessindustrie auf das industrielle Wassermanagement. *GWF, Wasser - Abwasser* 2023 (4) (2023), S. 63-67.
- [7] Chabilan, A.; Ledesma, D.G.B.; 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* 866 (2023) 161385, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161385.
- [8] Du, R.; Horn, H.; Cao, S.: Maximizing anammox in mainstream wastewater treatment: An integrated nitrite producing approach. *Chemical Engineering Journal* 468 (2023) 143696, DOI: 10.1016/j.cej.2023.143696.
- [9] Gmurek, M.; Alexander, J.; Mazierski, P.; Miodyńska, M.; Fronczak, M.; Klimczuk, T.; Zaleska-Medynska, A.; Horn, H.; Schwartz, T.: Enhancement of photocatalytic-based processes by mono- and bimetallic (CuPd) rutile loaded nanoparticles for antibiotic resistance genes



**Bild 3.4:** Permeabilität und Biofilmsensorsignal (links) und Biofilmdicke auf der Membran und auf dem Sensor (rechts), (modifiziert nach [5]).

and facultative pathogenic bacteria removal. *Chemical Engineering Journal* 462 (2023) 142243, DOI: 10.1016/j.cej.2023.142243.

- [10] Guo, L.; Ye, C.; Yu, X.; Horn, H.: Induction of bacteria in biofilm into a VBNC state by chlorine and monitoring of biofilm structure changes by means of OCT. *Science of The Total Environment* 891 (2023) 164294, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164294.
- [11] Hackbarth, M.; Gescher, J.; Horn, H.; Reiner, J.E.: A scalable, rotating disc bioelectrochemical reactor (RDBER) suitable for the cultivation of both cathodic and anodic biofilms. *Bioresource Technology Reports* 21 (2023) 101357, DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101357.
- [12] Härrer, D.; Elreedy, A.; Ali, R.; Hille-Reichel, A.; Gescher, J.: Probing the robustness of *Geobacter sulfurreducens* against fermentation hydrolysate for uses in bioelectrochemical systems. *Bioresource Technology* 369 (2023) 128363, DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128363.
- [13] Kern, S.; Lerner, R.; Schork, N.; Nirschl, H.; Heijnen, M.; Guthausen, G.: MRI on a new polymeric multichannel membrane for ultrafiltration. *Frontiers in Chemical Engineering* 4, 1083180 (2023), DOI: 10.3389/fceng.2022.1083180.
- [14] Moradipour, F.; Markert, A.; Rudszuck, T.; Röttgen, N.; Dück, G.; Finsterbush, M.; Gerbig, F.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Na<sup>+</sup> mobility in PEO-based composite solid-state electrolytes by NMR. *Journal of Energy and Power Technology* 5 (4) (2023), DOI: 10.21926/jept.2304032.
- [15] Morales, Y.; Samanta, P.; Tantish, F.; Horn, H.; Saravia, F.: Water management for Power-to-X offshore platforms: an underestimated item. *Scientific Reports* 13 (2023) 12286, DOI: 10.1038/s41598-023-38933-w.
- [16] Qian, J.; Riede, P.; Abbt-Braun, G.; Parniske, J.; Metzger, S.; Morck, T.: Removal of organic micropollutants from municipal wastewater by powdered activated carbon – activated sludge treatment. *Journal of Water Process Engineering* 50 (2022) 103246, DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103246.
- [17] Rudszuck, T.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Combined nuclear magnetic resonance methods in quality control of lubricants in green energy production. *Magnetic Resonance in Chemistry* (2023), DOI: 10.1002/mrc.5339.
- [18] Rudszuck, T.; Schork, N.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Nuclear magnetic resonance/magnetic resonance imaging on lubricating greases: Observation of bleeding and aging. *Magnetic Resonance in Chemistry* 60 (4) (2022), S. 452-462, DOI: 10.1002/mrc.5243.
- [19] Schmid, E.; Rondeau, S.; Rudszuck, T.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Inline NMR via a dedicated V-shaped sensor. *Sensors* 23 (5) (2023) 2388, DOI: 10.3390/s23052388.
- [20] Schork, N.; Ibrahim, M.; Baksi, A.; Krämer, S.; Powell, A.K.; Guthausen, G.: NMR relaxivities of paramagnetic, ultra-high spin heterometallic clusters within polyoxometalate matrix as a function of solvent and metal ion. *ChemPhysChem*, 23 (19) (2022) e202200215, DOI:10.1002/cphc.202200215.
- [21] Trapp, L.; Schacht, H.; Eymann, L.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Oil mobility in hazelnut oil-based oleogels investigated by NMR. *Applied Magnetic Resonance* (2023), DOI: 10.1007/s00723-023-01571-6.
- [22] Wang, Y.; Wang, X.; Wang, D.; Zhu, T.; Zhang, Y.; Horn, H.; Liu, Y.: Ferrate pretreatment-anaerobic fermentation enhances medium-chain fatty acids production from waste activated sludge: Performance and mechanisms. *Water Research* 229 (2023) 119457, DOI: 10.1016/j.watres.2022.119457.
- [23] Wang, Y.; He, Y.; Zheng, K.; Wei, W.; Ngo, H.H.; Guo, W.; Ni, B.-J.; Zhu, T.; Horn, H.; Liu, Y.: Ferric oxide stimulates medium-chain carboxylic acids synthesis from waste activated sludge via ethanol-driven chain elongation: Mechanisms and implications. *Journal of Cleaner Production* 389 (2023) 136044, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136044.

### Veröffentlichungen in nicht peer-reviewed

#### Fachjournalen:

- [24] Hille-Reichel, A.; Horn, H.; Schmidtke, J.; Mohr, M.; Maurer, P.; Schmid, S.; Morck, T. 2023. Kommunale Kläranlagen als Bioraffinerien. Zwei aktuelle Projekte aus Baden-Württemberg. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* (70)11, DOI: 10.3242/kae2023.11.003.

### Veröffentlichungen in der Schriftenreihe Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie:

- [25] Band 86: Sturm, M.T., 2023. Microplastics removal from water with organosilanes.
- [26] Band 87: Samanta, P., 2023. Pig manure treatment by membrane filtration.



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  
<https://wasserchemie.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  
<https://ceb.ebi.kit.edu/>



**Prof. Dr. Reinhard Rauch**

Engler-Bunte-Institut des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
Karlsruhe  
Tel.: 0721 608 42960  
reinhard.rauch@kit.edu  
<https://ceb.ebi.kit.edu/>



**Prof. Dr. Oliver Thomas Stein**

Engler-Bunte-Institut des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
Karlsruhe  
Tel.: 0721 608-46837  
oliver.t.stein@kit.edu  
<https://vbt.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  
<https://vbt.ebi.kit.edu/>



**TT-Prof. Dr. Moritz Wolf**

Engler-Bunte-Institut des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
Karlsruhe  
Tel.: 0721 608-22617  
moritz.wolf@kit.edu  
<https://ceb.ebi.kit.edu/>



