

# SONDERDRUCK

aus gwf Gas + Energie 06/2026 + 07-08/2026 und  
gwf-Wasser|Abwasser 06/2026

06|2026

Jahrgang 167

ISSN 0016-3651

B 5399

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 2025

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

**Harald Horn, Reinhard Rauch, Frederik Scheiff, Oliver Stein, Dimosthenis Trimis, Moritz Wolf**



# Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2025

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

Harald Horn, Frederik Scheiff, Dimosthenis Trimis, Reinhard Rauch, Oliver Stein und Moritz Wolf

Tätigkeitsbericht, Forschung und Lehre, 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 in den vergangenen Jahren erscheinen die gas-spezifischen Beiträge im gwf Gas + Energie (Teil 1: Ausgabe 6/2026, EBI ceb; Teil 2: Ausgabe 7-8/2026, EBI vbt) und der wasserspezifische Beitrag im gwf-Wasser | Abwasser (Teil 3: Ausgabe 6/2026, EBI WCT).*

## Zur Geschichte und zum Umfeld des EBI

Das Engler-Bunte-Institut (EBI) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat eine lange Tradition, die bis in das Jahr 1907 zurückreicht, als es als „Lehr- und Versuchsgasanstalt“ gegründet wurde. Seit 1971 trägt es den Namen „Engler-Bunte-Institut“ und ist eng mit praxisrelevanten Fragestellungen des Gas- und Wasserfaches verbunden. Die enge Verbindung zwischen Forschung und Praxis wird deutlich durch die Tatsache, dass die Professoren für „Verfahrenstechnik Chemischer Energieträger“, „Verbrennungstechnik“ und „Wasserchemie und Wassertechnologie“ gleichzeitig die Leitung der entsprechenden Bereiche der DVGW-Forschungsstelle am EBI innehaben (**Bild 0.1**). Im Jahr 2025 wurde mit der Restrukturierung der DVGW-Forschungsstelle begonnen, die mit dem Jahr 2026 final umgesetzt werden soll.

Das KIT als „Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft“ verbindet die Breite der Disziplinen und des Wissens mit den großen Herausforderungen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft. Der universitäre Teil, dessen Wurzeln bis ins Jahr 1825 zurückreichen, repräsentiert die Vielfalt der Disziplinen und des Wissens. Die Helmholtz-Welt konzentriert sich traditionell auf die Bearbeitung großer und drängender Fra-

gen aus Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft. Ein besonderer Fokus ist auf die Energiewende und den Umbau des Energiesystems in Deutschland gerichtet, wobei die Schwerpunkte auf Energieeffizienz, Erneuerbare Energien, Energiespeicher, Netze und Elektromobilität liegen. Das EBI trägt mit seiner Forschung und Lehre maßgeblich zu diesen Zielen bei.

## Forschung und Beratung am Engler-Bunte-Institut

Die Forschungsgruppen des EBI und die DVGW-Forschungsstelle erweiterten in 2025 ihr Portfolio in den Bereichen Energie und Umwelt, wobei der aktuelle Fokus verstärkt auf Wasserstoffproduktion und -nutzung liegt.

Die am Engler-Bunte-Institut (EBI) organisierten Forschungsgruppen sowie die am EBI angesiedelte DVGW-Forschungsstelle bearbeiten ein breites Spektrum von Aufgaben in den Themenfeldern Energie und Umwelt. Im Kalenderjahr 2025 wurden zahlreiche neue Projekte erfolgreich akquiriert, wodurch das Forschungsportfolio signifikant erweitert wurde. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff und seiner Derivate, einer Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung energetischer

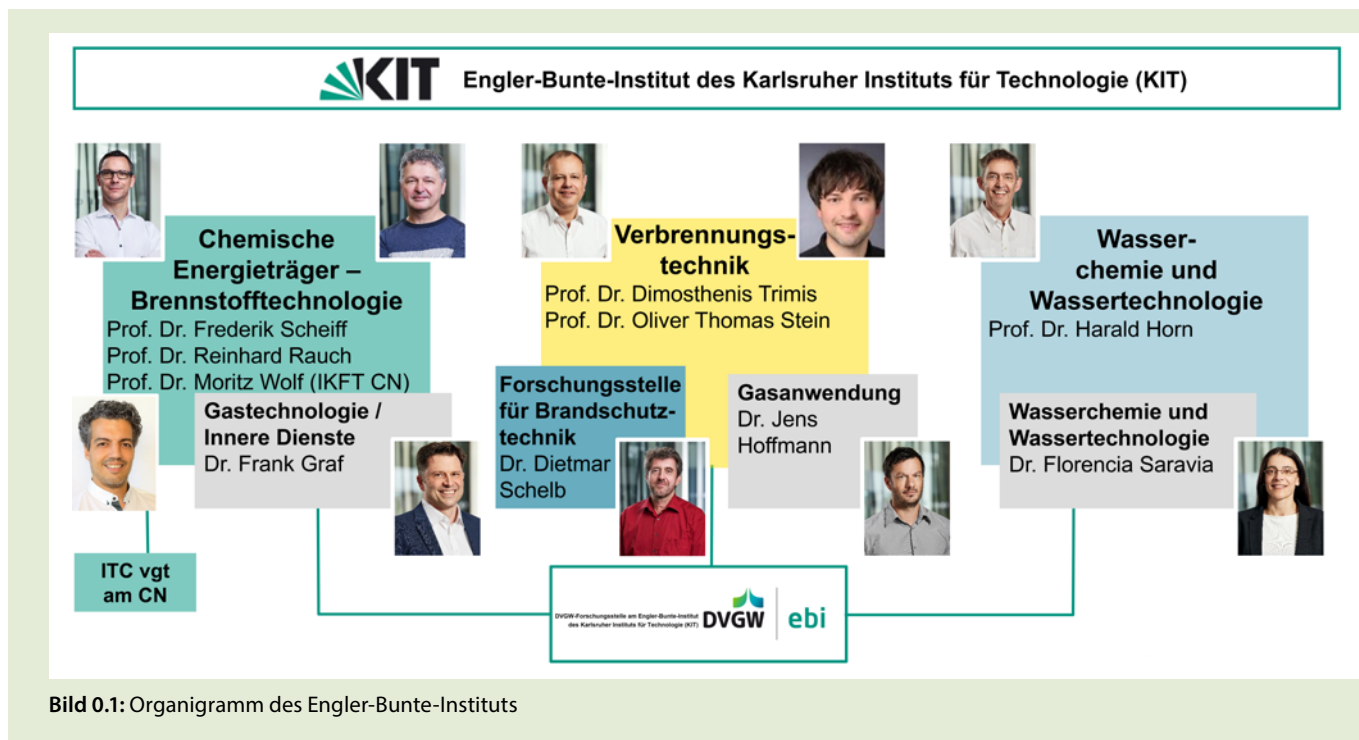


Bild 0.1: Organigramm des Engler-Bunte-Instituts

Systeme. Diese Thematik wird primär an der DVGW-Forschungsstelle im Bereich Gastechologie und im zugehörigen Prüflaboratorium Gas adressiert, wo experimentelle und analytische Methoden zur Optimierung von Produktionsprozessen entwickelt werden. Die finanzielle Basis der Forschungsaktivitäten setzt sich aus öffentlichen Fördermitteln sowie aus Aufträgen der Industrie zusammen. Durch diese duale Finanzierung wird einerseits die wissenschaftliche Unabhängigkeit gewahrt, andererseits die Praxisrelevanz der Ergebnisse sichergestellt. Die Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts (GdF) fungiert als wichtiger Partner des EBI. Sie leistet zuverlässige und großzügige Unterstützung, die sowohl der Forschung dient als auch die Beschaffung von Infrastruktur ermöglicht.

Der DVGW-Studienpreis 2025 in der Sparte Gas wurde am 24. September 2025 anlässlich des DVGW Kongress in Bonn an Frau M.Sc. Anna Linnea Rieck für Ihre Masterarbeit zum Thema „Beschreibung der Hydrierung der Flüssigphase als Nebenreaktion bei der Dreiphasen-Methanisierung“ verliehen.

Am 29. Juli 2025 hat Prof. Frederik Scheiff seine Antrittsvorlesung mit dem Titel „Über chemische Rohstoffe und Energieträger im Kontext von Energietransformation und Kreislaufwirtschaft“ gehalten und mit diesem sehr aktuellen Thema überaus positive Resonanz erhalten. Die herausragende Bedeutung des Engler-Bunte-Instituts für das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde auch bei einem Besuch des Präsidenten des KIT, Prof. Jan S. Hesthaven, der sich am 15.10.2025 über aktuelle Forschungsthemen informierte, hervorgehoben.

Mit tiefem Bedauern und Anteilnahme nahmen die Mitarbeiter des Engler-Bunte-Instituts das Ableben von Herrn

Prof. André Braun (1941 – 2025) zur Kenntnis; André Braun war von 1992 bis 2006 Leiter des Lehrstuhls für Umweltmesstechnik am Engler-Bunte-Institut und von 1995 bis 1997 auch Dekan der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik.

### Lehre und Ausbildung

Auch in der Lehre ist das EBI aktiv und bietet Studiengänge in Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik sowie Bioingenieurwesen an. Im Wintersemester 2025/26 wurden 133 Bachelor- und 78 Masterstudierende im Chemieingenieurwesen sowie 84 Bachelor- und 23 Masterstudierende im Bioingenieurwesen begrüßt. Der englischsprachige Master-Studiengang „Water Science and Engineering“ verzeichnet eine stetig steigende Nachfrage, wobei 28 Studierende im ersten Fachsemester immatrikuliert wurden.

Die herausragenden Leistungen der Studierenden werden durch Preise der GdF gewürdigt. Im Jahr 2025 erhielt ein Masterstudierender den Preis für die beste Masterarbeit: Marius Weiser erhielt die Auszeichnung für seine Arbeit zum Thema „Bestimmung der Temperaturverteilung in technischen Wabenkatalysatoren für die katalytische Methanisierung“, welche von Martin Kansy und Prof. Thomas Kolb betreut wurde.

Das Engler-Bunte-Institut ist somit ein wichtiger Akteur in der Forschung und Lehre im Bereich Energie und Umwelt, der durch seine enge Verbindung zwischen Wissenschaft und Praxis sowie seine international sichtbare Forschung einen bedeutenden Beitrag zu aktuellen und zukünftigen Herausforderungen leistet.

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

Frederik Scheiff, 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 Energieträgerumwandlung 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 Wasserstoff und erneuerbaren Brennstoffen, neue Biobrennstoffe 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 weiterhin 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 Gastechnik“, „Wirbelschichttechnik“, „Catalysts for the Energy Transition“ und „Chemical Hydrogen Storage“ werden von den Lehrenden des EBI ceb angeboten. Darüber hinaus beteiligen sich die Lehrenden auch an gemeinsamen Veranstaltungen mit der Fakultät für Chemie und Biowissenschaften (z.B. „Catalysis for Sustainable Chemicals and Energies“). 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 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 industriellen Anlagenkomplex. Zudem gelang es im zurückliegenden Jahr die Weichen für einen dauerhaften Erhalt des Prozess- und Anlagentechnikpraktikums über die Lebenszeit der bioliq-Pilotanlage hinaus zu stellen.

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 Profilmfach „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 grundlegende Kenntnisse der Ethik und wichtige Stoffkreisläufe auf der Erde und ihre Beeinflussung durch die Gesellschaft den Studierenden im Bachelorstudium vermittelt werden.

Im zurückliegenden Jahr haben die Lehrenden von EBI ceb an der Neustrukturierung des Bachelor-CIW-Studiengangs mitgewirkt. In dem neu überarbeiteten Curriculum wird es u. a. eine neue Erstsemesterveranstaltung „Einführung in das Chemieingenieurwesen“ geben, bei der EBI ceb das Themenfeld „Energie in der Verfahrenstechnik“ abdecken wird.

Für den Masterstudiengang CIW wurde eine neue Lehrveranstaltung „Elektrifizierung der Prozesstechnik“ vorbereitet, die erstmals im Sommersemester 2026 angeboten wird und eng an die neuen Forschungsthemen von EBI ceb angebunden ist.

### 1.2 Bemerkenswerte Ereignisse in 2025

#### **Antrittsvorlesung von Herrn Prof. Frederik Scheiff**

Im Rahmen des Fakultätskolloquiums CIW kamen am 29.07.2025 über 100 interessierte Gäste, Kolleginnen und Kollegen, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zur Antrittsvorlesung von Herrn Prof. Scheiff zusammen. Prof. Scheiff referierte über „Chemische Rohstoffe und Energieträger im Kontext von Energietransformation und Kreislaufwirtschaft“ und stellte seine Vorhaben in Forschung und Lehre vor. Beim anschließenden Empfang feierten drei Generationen der Engler-Bunte-Institutsleitung, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, Ehemalige, Weggefährten und Freunde zusammen und ließen den Abend bei schönem Sommerwetter im Foyer des Engler-Bunte-Instituts ausklingen (**Bild 1.1 li.**).



Bild 1.1 li.: Prof. Frederik Scheiff bei seiner Antrittsvorlesung



Bild 1.1 re.: Rudolph-Günther-Preis 2025 (v.li.n.re): Prof. Pitsch, RWTH Aachen, Prof. Kolb, Prof. Reinhold Kneer, RWTH Aachen

### 1.2.1 Auszeichnungen

#### **Rudolph-Günther-Preis für Herrn Prof. Dr. Thomas Kolb**

Für seine herausragenden wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet der Verbrennung und Vergasung flüssiger und fester, komplexer Brennstoffe wurde anlässlich des 32. Deutschen Flammentags im September 2025 der Rudolf-Günther-Preis an Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb verliehen (Bild 1.1 re.). Die Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. und das Combustion Institute (Deutsche Sektion) würdigten damit seinen Verdienst, zum Verständnis von Hochtemperaturprozessen zur Stoff- und Energiewandlung von der Grundlagenforschung zur Aufklärung von Phänomenen auf den kleinsten Skalen, bis zur Skalierung technischer Verfahren durch experimentelle Arbeiten und modelltechnische Beschreibungen beigetragen zu haben. Beispielhaft werden seine Forschungsarbeiten zur Hochdruck-Flugstromvergasung im Rahmen des von ihm mitinitiierten bioliq®-Projektes genannt, die von der Beschreibung der Teilprozesse in der Flamme bis zum Betrieb einer 5 MW-Pilotanlage reichen.

Der Rudolf-Günther-Preis ist eine renommierte Auszeichnung im Bereich der Verbrennungsforschung in Deutschland. Er wurde von der Deutschen Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. und der Deutschen Sektion des Combustion Institute ins Leben gerufen, um herausragende, langjährige Leistungen in der wissenschaftlichen Erforschung oder industriellen Nutzung sicherer, umweltverträglicher und effektiver Verbrennungsvorgänge zu würdigen. Benannt ist der Preis nach dem ehemaligen Inhaber des Lehrstuhls für Feuerungstechnik am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH) und Begründer der Karlsruher Schule für Verbrennungstechnik, u. a. zeitweise Dekan der Fakultät für Maschinenbau, einige Jahre später Gründungsmitglied und erster Dekan der Fakultät für Chemieingenieurwesen an der Universität Karlsruhe.

#### **Preis der Gesellschaft der Freunde für Herrn M.Sc. Marius Weiser**

Die Auswahlkommission des Vorstandes der Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts hat in 2025 die Masterarbeit von Herrn Marius Weiser für den GdF-Preis bestimmt.

Die Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts am KIT e.V. prämiiert jährlich eine sehr gute Masterarbeit im Bereich Verfahrenstechnik, Energie und Wasser, bei deren Anfertigung sich Studierende durch besonderes Engagement, Kreativität und Methodik hervorgehoben haben.

Das jährliche Preisgeld beträgt 2.000 €. Mit dem Preis wird auch eine Urkunde verliehen. Die Preisverleihung findet jedes Jahr im Rahmen der Mitgliederversammlung der Freunde des Engler-Bunte-Instituts statt. Der Preisträger präsentiert seine Arbeit bei der Jahresversammlung der Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts e.V.

Zusätzlich wurde Herrn Marius Weiser auch der Emil-Kirschbaum-Preis 2025 für den besten Masterabschluss im Studiengang Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik der KIT-Fakultät verliehen (Bild 1.2).

#### **Einfach ausgezeichnet – Fachkräfte von morgen – Zweitplatzierung von M.Sc. Anna Linnea Rieck**

Aus der Vielzahl der Bewerbungen für den DVGW-Studienpreis 2025 in der Sparte Gas wurde am 24. September 2025 anlässlich des DVGW Kongress in Bonn Frau M.Sc. Anna Linnea Rieck für Ihre Masterarbeit zum Thema „Beschreibung der Hydrierung der Flüssigphase als Nebenreaktion bei der Dreiphasen-Methanisierung“, die unter der Betreuung von Herrn Prof. Kolb entstanden war, durch die Fachjury als Zweitplatzierte ermittelt. Die Arbeit von Frau Rieck überzeugte durch wissenschaftliche Exzellenz und hohen Praxisbezug (Bild 1.3).

Alle zwei Jahre würdigt der DVGW herausragende Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten, die einen Bezug zur Energie- u. Wasserwirtschaft aufweisen.



**Bild 1.2:** GdF-Preis 2025 (v.li.n.re): M. Sc. Martin Kansy, M. Sc. Marius Weiser, Dr.-Ing. Bernd Prade, Siemens Energy, 2. Stellv. Vorsitzender GdF, Prof. Thomas Kolb



**Bild 1.3:** DVGW-Studienpreisverleihung 2025: Dr. Dirk Waider, DVGW-Vizepräsident Wasser (li. i. Bild), Anna Linnea Rieck, zweiter Platz Gas/Energie (2. Reihe Mitte), Gunar Schmidt, DVGW-Vizepräsident Gas/Energie (re. i. Bild); © Nothers Hempel

### 1.2.2 Internationale Zusammenarbeit

#### **KATHES Workshop**

Im Februar 2025 organisierte der KIT-Vizepräsident für Internationales, Prof. Hirth, mehrere thematische Workshops zum Austausch der Aristotle University of Thessaloniki, dem Centre for Research and Technology, Hellas and Thessaloniki, Innovation and Technology Center, und dem Karlsruher Institut für Technologie. EBI ceb war u. a. an einem Workshop zum Thema „Energy Transition at Times of Changing Climate“ beteiligt. Dabei wurden die Themen von EBI ceb und von den beteiligten griechischen Institutionen präsentiert und diskutiert. Ein großes Thema des Workshops waren mögliche zukünftige Zusammenarbeiten und die Finanzierung dieser Arbeiten. Der nächste Workshop wird im September 2026 in Thessaloniki stattfinden.

#### **Reise zum wissenschaftlichen Austausch nach Schweden**

Im Mai 2025 wurden mit dem Besuch der Lulea University of Technology, langjähriger Kooperationspartner des KIT auf dem Gebiet der thermochemischen Brennstoffumwandlung die internationalen Kontakte auf wissenschaftlicher Ebene weiter ausgebaut.

#### **Besuch einer Forschergruppe des NREL**

Anlässlich des KIT Energy Symposiums 2025 war EBI ceb für zwei Wochen Gastgeber für Forschende des National Renewable Energy Laboratories (NREL) – kürzlich aus aktuellen Anlässen in National Laboratory of the Rockies (NRL) umbenannt. Das NRL befindet sich in Golden (Colorado). Es wird vom Energieministerium der Vereinigten Staaten (United States Department of Energy) finanziert. Es gilt als das wichtigste

Labor der USA für Forschung und Entwicklungen auf den Gebieten erneuerbare Energie und Energieeffizienz.

Die NRL-Forscher Kerry Rippy und Dan Ruddy beschäftigen sich mit CCU/S, thermischer Energiespeicherung und H<sub>2</sub>-Einbindung in die Schwerindustrie und Katalyse in den dazu benötigten Umwandlungsschritten. Im Rahmen des brennstofftechnischen Seminars des EBI ceb stellten sie ihre Forschungsaktivitäten sehr anschaulich dar.

### 1.2.3 Öffentlichkeitsarbeit

Auch im Jahr 2025 haben sich die wissenschaftlichen Mitarbeiter des EBI ceb mit Institutsführungen und öffentlichen Vorträgen auf internationalen Konferenzen eingebracht.

#### **BASF und KIT im Dialog**

Sehr sichtbar war EBI ceb bei der Veranstaltung BASF und KIT im Dialog, die anlässlich des 200-jährigen Bestehens des KIT am 14.11.2025 am KIT stattfand, beteiligt. Mit seinem Beitrag zur Podiumsdiskussion berichtete Prof. Scheiff von Karrierepfaden in Industrie und Academia sowie deren Unterschiede und Gemeinsamkeiten.

#### **DGMK Bezirksgruppe Oberrhein**

Zur Herbstveranstaltung der DGMK Bezirksgruppe Oberrhein (BG OR) kamen am 25.11.2025 Mitglieder und Gäste der BG OR zu interessanten Vorträgen am Standort Worms der Fa. GRACE zusammen. Die Themen waren „Der Einfluss der Energiewende auf die Anforderungen an Raffineriekatalysatoren“, „CO<sub>2</sub> – Wohin damit?“ und „Hochlauf der CO<sub>2</sub>-Infrastruktur – Herausforderungen“. Im Rahmen der Veranstaltung übergab der bisherige Vorsitzende der BG OR, Herr Prof. Kolb, den Vorsitz an Herrn Prof. Scheiff. Es ist lange Tradition, dass der



**Bild 1.4:** (v.li.n.re) Prof. Kolb, Dr. Gesa Netzeband, DGMMK-Geschäftsführerin, Prof. Scheiff, Gerhard Zimmermann, stellv. Vorsitzender DGMMK BG OR, MiRO, Leiter Technischer Service

jeweils aktuelle Lehrstuhlinhaber der brennstofftechnischen Themen des EBI den Vorsitz der BG OR innehat (**Bild 1.4**).

#### 1.2.4 EBI ceb - intern

##### **Wanderseminar**

Das Doktoranden-/Wander-Seminar wurde Ende März 2025 erstmals unter der Leitung von Herrn Prof. Scheiff wieder im Naturfreundehaus Rahnenhof im Pfälzer Wald veranstaltet. In entspannter Atmosphäre und beim Wandern konnten die Promotionsthemen diskutiert werden und es blieb Zeit und Raum für persönliche Gespräche.

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

Mitte Juli 2025 kamen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des EBI ceb und der DVGW-Forschungsstelle am Vormittag wieder nahe Karlsruhe zum Wandern zusammen und ließen den Tag dann am Nachmittag gemeinsam mit allen Mitarbeitern des gesamten EBI in einem fröhlichen Sommerfest im Innenhof des Instituts ausklingen. Im Dezember organisierten die Mitarbeiter eine stimmungsvolle Weihnachtsfeier und in besinnlicher Runde der EBI ceb, DVGW gt, und einiger ehemaliger Mitarbeiter wurde das Arbeitsjahr 2025 beendet.

#### 1.3 Forschungsprojekte im Jahr 2025

Auch im Jahr 2025 wurden am EBI ceb und im Bereich Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle wichtige Forschungsprojekte aus dem Umfeld der Energiewende und der Gaswirtschaft durchgeführt. Besonders hervorzuheben sind dabei folgende Projekte:

1. **REF4FU (BMDV):** Die Arbeiten im Vorhaben „Erneuerbare Kraftstoffe aus Grünen Raffinerien der Zukunft“, welches vom IKFT koordiniert wird, wurden 2025 fortgeführt. Die Gruppe von Prof. Rauch beschäftigte sich mit der Hydrierung der Schwerbenzinfraction des Methanol-to-Gasoline-Prozesses. Schwerpunkt der Arbeiten war die Hydrierung von Schwerbenzin und Aromaten zu Cycloparaffinen, um Blendingkomponenten für Kerosin herzustellen.
2. **CARE-O-SENE (BMFTR):** Das Verbundprojekt (<https://care-o-sene.com/>) umfasst sieben deutsche und südafrikanische Projektpartner und wurde bis Ende 2026 verlängert. Ziel ist die wirtschaftliche Produktion von synthetischem Kerosin als Kraftstoffalternative für den Flugverkehr. Die Arbeitsgruppe von TT-Prof. Dr. Moritz Wolf trägt zur Entwicklung und Herstellung von Modellkatalysatoren bei, um mittels fortschrittlicher Charakterisierungstechniken Einblicke in strukturelle Abhängigkeiten und Funktionsprinzipien zu gewinnen.
3. **SFB 1441 (DFG):** Das Projekt „Dynamische Reaktoren durch Induktionserwärmung von Katalysatoren“ wurde in 2024 im Rahmen der Begutachtung des Sonderforschungsbereichs 1441 positiv evaluiert und stellt somit seit 2025 ein Teilprojekt dessen zweiter Förderperiode dar. Der Sonderforschungsbereich 1441 (<https://www.trackact.kit.edu/>) „Tracking the Active Site in Heterogeneous Catalysis for Emission Control“ wird durch das Projekt um die Anwendung elektromagnetischer induktiver Beheizung katalytischer Reaktoren erweitert. Neben der Erforschung verschiedener Konzepte zur Induktionserwärmung von Katalysatoren für die Emissionskontrolle werden auch Katalysatormaterialien sowie induktiv heizbare Materialien entwickelt.
4. **H<sub>2</sub>-Leitprojekt TransHyDE (BMFTR):** In dem aus neun Verbänden bestehenden Projekt mit 85 Partnern und einer Gesamtförderung von ca. 140 Mio. € wurden 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 Labormessungen 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> adres-

siert. Außerdem wurde das zukünftige europäische H<sub>2</sub>-Transportnetz anhand eines im Verbund entwickelten Szenarios simuliert.

5. H<sub>2</sub>-Leitprojekt H<sub>2</sub>Mare (BMFTR): Das aus vier Verbänden bestehende Projekt mit 32 Partnern und einem Fördervolumen von ca. 105 Mio. € wurde in 2025 erfolgreich abgeschlossen. EBI ceb und DVGW gt entwickelten darin gemeinsam die Prozesskette zur Offshore-Erzeugung von regenerativ erzeugtem Liquefied Natural Gas (LNG) auf Basis der am Institut entwickelten Waben-Methanisierung weiter. Neben Grundlagenuntersuchungen am Institut und theoretischen Betrachtungen und vergleichenden Bewertungen mit anderen Prozessketten wurde die LNG-Prozesskette im Demomaßstab von der Methanisierung und Gasaufbereitung bis hin zur Verflüssigung am KIT Energy Lab umgesetzt.
6. ENSURE III (BMFTR): In der dritten Projektphase führt DVGW gt die Modellierarbeiten zur Sektorenkopplung und zu Energiehubs fort und ist außerdem im Verbund für das Thema Wasserstoff zuständig ist. Inzwischen wurden erste Erkenntnisse gewonnen und in Handlungsempfehlungen für die Branche gegossen.

#### 1.4 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 2025

Folgende wissenschaftliche / studentische Arbeiten kamen im Institutsteil EBI ceb im Jahr 2025 zum Abschluss:

##### **Dissertationen**

Nach erfolgreicher Forschungsarbeit am EBI ceb und ITC vgt wurde in 2025 zum Dr.-Ing. promoviert:

- Praseeth Prabhakaran "Energy system integration of Dynamic Power to Gas systems with 3 Phase Methanation for effective sector coupling", Referent Prof. Kolb

##### **Masterarbeiten**

Ihre Masterarbeit haben in 2025 erfolgreich abgeschlossen:

- Luca Eichhorn, "Untersuchung des Wärme- und Stofftransports in katalytisch beschichteten metallischen Strukturen", Prof. Kolb
- Fiona Lauer, "Reaktionstechnische Untersuchungen der katalytischen Methanisierung in Wabenreaktoren", Prof. Kolb
- Jonathan Schmitz, "Beschreibung des Druckeinflusses auf die Zerstäubung mit 3-flutigen Sheetdüsen", Prof. Kolb
- Manuel Rosato, "Kinetische Untersuchungen und Reaktordesign zum Hydroprocessing von Methanol basierten Aromaten", Prof. Rauch
- Can Cakiroglu, "Techno-Economic Analysis of Offshore Methanol Production with Consideration of Fluctuating Input Flows", Prof. Rauch
- Robin Andy Hofmann, "Untersuchung des Einflusses von Partikeleigenschaften für die sorptionsgestützte CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch-Synthese in einem neuartigen Reaktorkonzept", Prof. Rauch

- Jana Scherer, "Untersuchungen zu optimiertem Hydrocracking von Fischer-Tropsch-Wachsen zu Flugtreibstoff", Prof. Rauch
- Anna Lena Richter, "Untersuchung des Einflusses von Sorptionsmitteln auf die sorptionsgestützte CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch-Synthese", Prof. Rauch

##### **Bachelorarbeiten**

Ihre Bachelorarbeit haben in 2025 erfolgreich abgeschlossen:

- Philipp Kosolapov, "Entwicklung eines formalkinetischen Modells für die Methanpyrolyse", Prof. Scheiff
- Tobias Witte, "Homogene Pyrolyse von Methan – Bestimmung der Reaktionskinetik in einem Laborreaktor", Prof. Scheiff
- Jean Daniel Preuß, "Bestimmung der Wärmetransportigenschaften von technischen Wabenkörpern mittels faseroptischer Temperaturmessung", Prof. Kolb
- Felix Elleser, "Langzeitverhalten und Recyclebetrachtungen der dreiphasigen CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch-Synthese", Prof. Rauch

#### 1.5 Laufende wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 2025

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

Siegfried Bajohr, Niklas Burkhardt, Martin Kansy, Monika Klaus, Simon Sauereschell, Marius Weiser

##### **Methanisierung im Dreiphasen-Reaktor**

Das Engler-Bunte-Institut betreibt seit 2019 eine 100 kW Pilotanlage zur katalytischen Dreiphasen-Methanisierung (3PM) am KIT Energy Lab (<https://www.elab.kit.edu>). Die zentrale Baugruppe der Anlage ist der Dreiphasen-Blasensäulenreaktor, in dem die katalytische Methanisierungsreaktion von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>O abläuft und welcher bei Temperaturen von bis zu 330 °C und Drücken von bis zu 25 bar betrieben werden kann. Mit der 3PM-Anlage wurden in den vergangenen Jahren diverse einwöchige Versuchskampagnen durchgeführt, bei denen die Dreiphasen-Methanisierung sowohl unter stationären als auch unter dynamischen Betriebsbedingungen erfolgreich betrieben wurde und wertvolle Ergebnisse für das grundlegende Prozessverständnis als auch für die Einbindung in PtG-Prozessketten lieferte.

Das Verhalten des Blasensäulenreaktors der 3PM-Anlage unter wechselnden Betriebsbedingungen wird jedoch nicht nur experimentell untersucht, sondern wird auch mithilfe von Simulationsmodellen beschrieben, die auf Basis der Versuchsergebnisse der Pilotanlage, reaktionskinetischen Untersuchungen im Labor und theoretischer und experimenteller Arbeiten zum Stofftransport permanent verbessert werden. Für eine tiefgehende Validierung dieser Modelle ist es vor allem erforderlich, Korrelationen für interne Modellparameter messtechnisch zu überprüfen und ggf. zu korrigieren. Wichtige Parameter sind dabei unter anderem der relative Gasgehalt sowie volumetrische Stoffübergangskoeffizienten, für die

es keine zuverlässigen Literaturdaten gibt. Daher wurden zur experimentellen Bestimmung dieser Parameter aufwändige Umbauarbeiten an der 3PM-Anlage durchgeführt, die 2025 erstmals deren Betrieb in einem geschlossenen Gaskreislauf ermöglichten. Durch den Gaskreislauf-Betrieb ergeben sich experimentelle Möglichkeiten, die auf Grund ihrer Neuartigkeit auf großes Interesse in der Fachwelt stoßen.

In den Kampagnen in 2025 wurden sowohl Messungen zum Stoffübergang als auch zum relativen Gasgehalt durchgeführt. Die aktuell noch unveröffentlichten Ergebnisse aus 2025 und der laufenden Arbeiten werden in 2026 in wissenschaftliche Publikationen und eine Promotionsarbeit einfließen.

### **Methanisierung im Waben-Reaktor**

Im Jahr 2025 wurden die laufenden Arbeiten zur Waben-Methanisierung im Rahmen des BMBF-Projekts H<sub>2</sub>Mare fortgesetzt und mit Auslaufen der Förderperiode abgeschlossen. Die Ziele der H<sub>2</sub>Mare begleitenden Arbeiten am EBI ceb waren die Entwicklung eines Reaktorkonzepts für den dynamischen Betrieb von Methanisierungsanlagen mit einer Kapazität von 100 MW oder mehr. Hierfür wurde unter anderem ein detailliertes CFD-Modell zur Beschreibung der dafür vorgesehenen katalytisch beschichteten metallischen Wabenkörper entwickelt und mit experimentellen Daten verglichen. Durch den Vergleich reaktionskinetischer Ansätze aus Literaturquellen und aus eigenen Untersuchungen wurde festgestellt, dass bisher keiner der Ansätze ein zuverlässiges Scale-up alleine auf Basis von Simulationsrechnungen erlaubt.

Zur detaillierteren Untersuchung der Reaktionskinetik wurde daher ein Mikroprofilreaktor oder Compact Profile Reactor (CPR), welcher am EBI ceb für die Methanolsynthese aufgebaut und genutzt wurde, für die Methanisierung umgerüstet. Mit dem CPR können hochaufgelöste Konzentrations- und Temperaturprofile in einer idealen Katalysatorschüttung gemessen werden, woraus wiederum direkt reaktionskinetische Parameter ableitbar sind.

Ein typisches Versuchsergebnis aus dem CPR ist in **Bild 1.5** dargestellt. Zu sehen ist, wie der Stoffmengenanteil an CO<sub>2</sub> nach Eintritt in die Katalysatorschüttung (grau schraffierter Bereich) abnimmt. Gleichzeitig nimmt der Gehalt des Reaktionsproduktes CH<sub>4</sub> im gleichen Maß zu. Über den Verlauf der Schüttung im Reaktor wird ein Umsatz von ca. 70 % erzielt. Das parallel zum Stoffmengenanteil gemessene Temperaturprofil zeigt am Anfang der Katalysatorschüttung die größte Wärmefreisetzung auf Grund der stark exothermen Reaktion. Anschließend fällt die Temperatur durch die Wärmeabfuhr an die Reaktorwand und die geringere Wärmefreisetzung zum Ende der Schüttung hin wieder ab. Das **Bild 1.5** zeigt auch den Vergleich der Messwerte mit den Simulationsergebnissen, die aus den zuvor genannten Gründen bisher noch kein zufriedenstellendes Ergebnis liefern. Die aktuellen Arbeiten zielen daher auf die Verbesserung der reaktionskinetischen Modelle und die Übertragung der Ergebnisse aus dem CPR in den realen Wabenreaktor ab, um damit das Scale-up techni-

scher Methanisierungsreaktoren zu vereinfachen. Die aktuell noch unveröffentlichten Ergebnisse aus 2025 und der laufenden Arbeiten werden in 2026 in wissenschaftliche Publikationen und eine Promotionsarbeit einfließen.

[1] *Lauer, F.*; Reaktionstechnische Untersuchungen der katalytischen Methanisierung in Wabenreaktoren: Masterarbeit (2025).

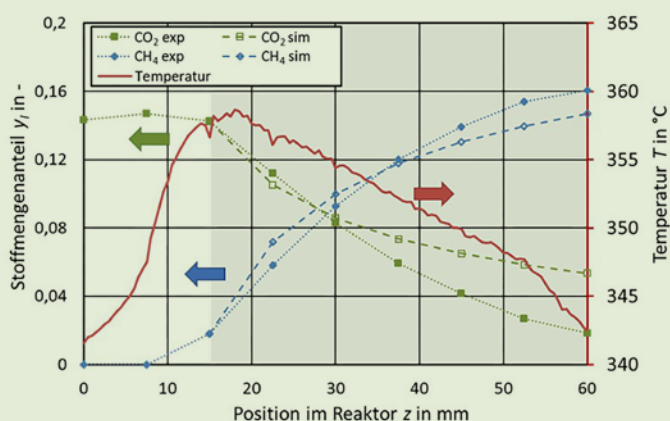
### **Methanpyrolyse**

Der Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten zur Methanpyrolyse lag im Jahr 2025 auf der Untersuchung des Einflusses der Reaktionsoberfläche auf die Pyrolysereaktionen und die daraus resultierenden Methanumsätze und Produktselektivitäten. Hierzu wurde die bereits vorgestellte EBI ceb Technikanlage verwendet, welche die Quantifizierung von gasförmigen Haupt- und Nebenprodukten der Methanpyrolyse mittels Gaschromatographie ermöglicht.

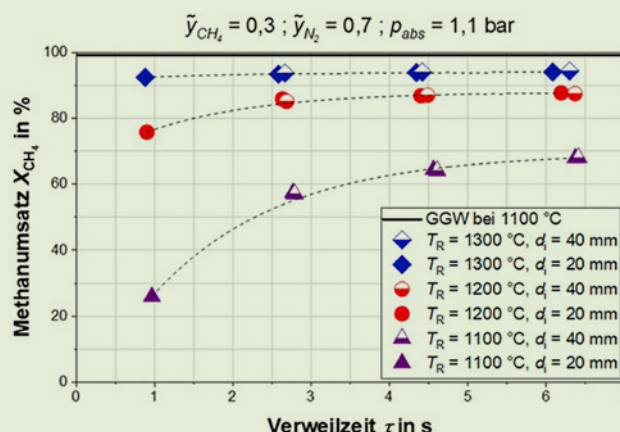
In ersten Versuchsreihen wurde der Einfluss von Temperatur, Verweilzeit und Eduktgaszusammensetzung auf den Methanumsatz und die Bildung von gasförmigen Nebenprodukten untersucht. Basierend auf den daraus resultierenden Ergebnissen konnte ein Prozessfenster identifiziert werden, in dem technisch relevante Methanumsätze erzielt werden können und gleichzeitig der Einfluss der Verweilzeit der Reaktionsgase in der heißen Zone auf den Fortschritt der Pyrolysereaktionen zu beobachten ist. Für die nachfolgenden Versuchsreihen wurde ein Temperaturbereich von 1.100 bis 1.300 °C und eine Verweilzeit der Gase in der heißen Reaktionszone von 1 bis 9 s festgelegt. In den Experimenten konnte durch die Quantifizierung der ein- und austretenden Massenströme die Massenbilanz für Kohlenstoff und Wasserstoff bis auf wenige Prozentpunkte geschlossen werden, was die Qualität und Belastbarkeit der generierten experimentellen Daten unterstreicht.

Anschließend wurde der Einfluss der Reaktionsoberfläche auf die Methanpyrolyse systematisch untersucht. Hierzu wurden zunächst im beschriebenen Prozessfenster Referenzversuche in einem Leerrohr mit einem Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von 200 m<sup>-1</sup> durchgeführt. Primäre Messgröße war dabei die Produktgaszusammensetzung, aus der sich der Methanumsatz und die Volumenanteile gasförmiger Nebenprodukte im Produktgas bestimmen lassen. Darauf aufbauend wurden die Referenzversuchspunkte in einem Leerrohr mit halbierten Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis durchgeführt und mit den Messdaten der Referenzversuche verglichen.

**Bild 1.6** zeigt die experimentell bestimmten Methanumsätze in Abhängigkeit von der Verweilzeit der Reaktionsgase in der Reaktionszone für Reaktionstemperaturen zwischen 1.100 und 1.300 °C. Zu erkennen ist eine positive Korrelation zwischen Reaktionstemperatur und Methanumsatz, was bei endothermen Pyrolysereaktionen der Erwartung entspricht. Der Einfluss der Verweilzeit auf die Methanumsätze ist temperaturabhängig. Während bei einer Reaktionstemperatur von 1.100 °C noch ein deutlicher Einfluss der Verweilzeit auf den Methanumsatz zu erkennen ist, hat diese bei einer Reaktionstemperatur bei 1.300 °C einen vernachlässigbaren Einfluss auf



**Bild 1.5:** Temperaturverlauf und Konzentrationsprofile für die kat. Methanisierung im Compact Profile Reactor (CPR);  $T_R = 350\text{ °C}$ ;  $H_2/CO_2 = 4\text{ mol/mol}$ ;  $y_{Ar} = 0,2\text{ mol/mol}$ ;  $GHSV = 16\ 000\text{ h}^{-1}$ ,  $p_{abs} = 10\text{ bar}$ , nach [1]



**Bild 1.6:** Experimentell bestimmter Methanumsatz als Funktion von Verweilzeit, Reaktionstemperatur und Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis.

den Methanumsatz. Dies zeigt die reaktionskinetische Hemmung der Pyrolysereaktionen bei niedrigeren Reaktionstemperaturen. Außerdem kann Bild 1.6 entnommen werden, dass ein doppeltes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis des Reaktionsrohrs keinen messbaren Einfluss auf den Methanumsatz hat. Als möglich Erklärung kann aufgeführt werden, dass die Hauptoberfläche im Leerrohr-System durch gebildete Feststoffpartikel aus der Gasphase bereitgestellt wird, und die eigentliche Leerrohroberfläche hierbei nur eine untergeordnete Rolle spielt.

In 2026 werden die Untersuchungen des Einflusses der Reaktionsoberfläche auf die Methanpyrolyse fortgesetzt und durch Einbringen einer inerten Schüttung sollen hierbei die relative Reaktionsoberfläche stark erhöht und daraus resultierende reaktionskinetische Zusammenhänge abgeleitet werden.

### Ammoniak-Cracken

Um den prognostiziert steigenden Bedarf an Wasserstoffimporten decken zu können, gewinnen schnell umsetzbare Technologien für den effizienten Transport von Wasserstoff über große Distanzen zunehmend an Bedeutung. Entsprechende Möglichkeiten wurden bereits 2023 in der DVGW-Studie „Transportoptionen von Wasserstoff“ (G 202224) ausführlich beschrieben. Ammoniak hat sich dabei aufgrund seiner hohen Energiedichte und der weltweit etablierten Infrastruktur für Transport und Speicherung als vielversprechender Wasserstoffträger herausgestellt.

Allerdings stehen für die Rückumwandlung von Ammoniak in Wasserstoff und Stickstoff am Zielort bislang noch keine optimierten und praxiserprobten Anlagenkonzepte zur Verfügung. Insbesondere hinsichtlich Reaktorbeheizung, Katalysator- und Werkstoffauswahl sowie Edukt- und Produktaufbereitung besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Zur Erarbeitung von Auslegungsgrundlagen und verfahrenstechnischen Randbedingungen werden in Zusammenarbeit mit der DVGW-Forschungsstelle am EBI und als Teil des DVGW-Projektes „E-Import“ (G 202438) experimentelle Untersuchungen zum katalytisch unterstützten Ammoniak-Cracken durchgeführt. Als Teilaspekt der laufenden Untersuchungen liegt dabei der Fokus auf der Weiterentwicklung des eigentlichen Ammoniak-Crack-Reaktors. Speziell untersucht werden verfahrensspezifisch ausgewählte Katalysatoren und der Einfluss typischer Verunreinigungen in technischem Ammoniak auf die Prozesskette und die notwendigen Gasaufbereitungsschritte vor und nach dem Reaktor.

Für diese experimentellen Untersuchungen wurde am EBI ceb im Jahr 2025 eine Versuchsapparatur ausgelegt und aufgebaut, die sich aktuell in der Inbetriebnahme befindet.

### Elektrifizierung von Prozessen der chemischen Industrie

Die direkt-elektrische Beheizung chemischer Prozesse zum Ersatz fossiler Energieträger ist seit der Übernahme der Professur für Verfahrenstechnik chemischer Rohstoffe und Energieträger durch Prof. Frederik Scheiff neues Forschungsfeld am Engler-Bunte-Institut. Hauptgegenstand der laufenden Arbeiten ist die ohmsche Beheizung durch Verwendung von leitfähigen Formkörpern und Katalysatorträgern sowie Partikelbetten als Heizvolumen. Der wesentliche Vorteil ist die Wärmeeinbringung direkt im Reaktionsvolumen, wodurch sich aus dem von externen Wärmetransport ergebende klassische Designlimitierungen entfallen. Das primäre Ziel der Forschung hierzu am EBI ceb in 2025 war die Entwicklung von geeigneten Design- und Betriebsstrategien für Reaktoren mit innerer ohmscher Beheizung. Folgende Forschungsfrage wurden hierzu bearbeitet:

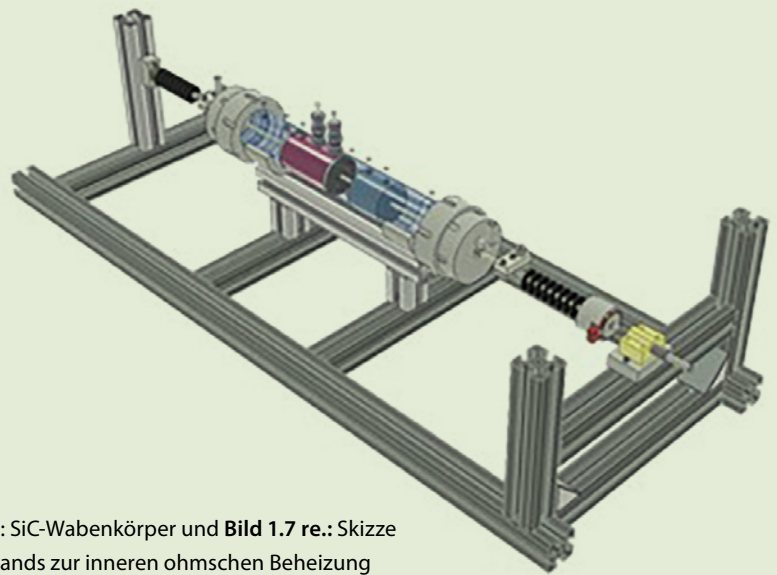
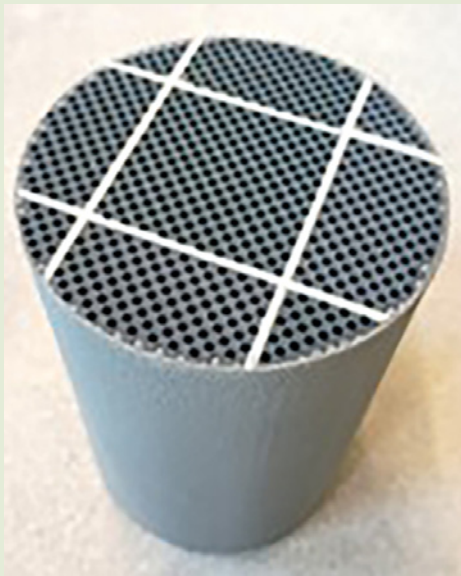


Bild 1.7 li.: SiC-Wabenkörper und Bild 1.7 re.: Skizze des Teststands zur inneren ohmschen Beheizung

### **Widerstandsmessung von elektrisch leitfähigen Formkörpern und Partikelschüttungen**

Die genaue Charakterisierung der temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit des Heizkörpers ist essenziell für die elektrische Auslegung des Reaktors und modellhafte Beurteilung der Reaktorstabilität. Durch Variation des Anpressdrucks können außerdem Korrelationen zur Beurteilung von Übergangswiderständen bei der Kontaktierung aufgestellt werden, nach denen sich die praktische Reaktorkonstruktion richtet. In 2025 wurden daher an der Entwicklung und dem Aufbau von mehreren Versuchsaufbauten gearbeitet, um sowohl unter Hochtemperatur als auch unter hohem Anpressdruck hochgenaue Widerstandsmessungen an unterschiedlichen Materialien aufzunehmen.

### **Modellierung des ohmschen Heizverhaltens leitfähiger Formkörper und Stabilitätsanalyse**

Besonders vielversprechend sind Formkörper aus elektrisch leitfähigen Keramiken wie Silicium-Carbid (SiC), da über die Materialmischung der spezifische elektrische Widerstand in weitem Bereich variiert werden kann. Durch das NTC-Verhalten („negative temperature coefficient“ des spezifischen elektrischen Widerstands) dieser Halbleiter entsteht jedoch im Betrieb der ohmschen Beheizung die Gefahr des thermischen Durchgehens. Hierzu wurde mit Arbeiten zur Ableitung geeigneter Stabilitätskriterien begonnen, nach denen ein sicherer und zeitstabiler Reaktorbetrieb möglich ist.

### **Experimentelle Untersuchung des ohmschen Heizverhaltens mikrostrukturierter Formkörper**

Die numerische und modellhafte Analyse der inneren ohmschen Beheizung wurden sukzessiv durch experimentelle Arbeiten ergänzt. Derzeit befindet sich ein Teststand im Auf-

bau, mit dem das Heizverhalten der oben beschriebenen Keramik-Körper erprobt werden soll (Bild 1.7 li., re.).

### 1.5.2 Arbeitsgruppe „Chemische Konversion erneuerbarer Energien“

Reinhard Rauch, Wiebke Asbahr,  
Philipp Graefe, Jonathan Rummel

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. 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 sorptionsunterstützte Reaktion und das dazu nötige Reaktor-konzept. 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.

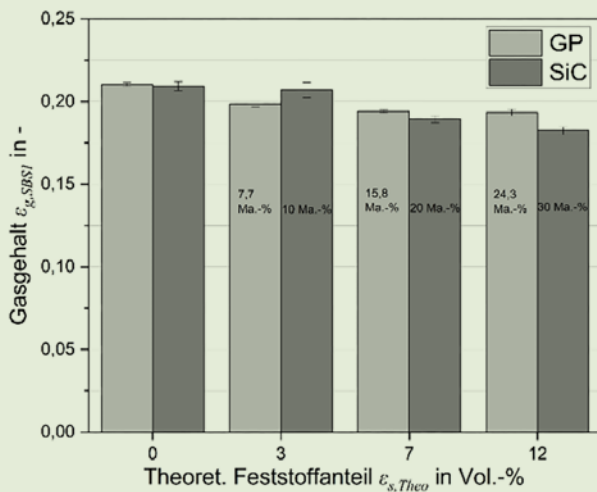
### **Neues Reaktorkonzept für die sorptionsgestützte CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch-Synthese**

Bei der CO<sub>2</sub>-FTS finden an einem Eisen-Katalysator zwei parallel ablaufende Reaktionen statt, zum einen die Reverse-Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS-Reaktion,  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ), und zum anderen die Fischer-Tropsch-Reaktion (FT-Reaktion,  $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). Bei letzterer FT-Reaktion entstehen die gewünschten Produkte, ein breites Spektrum langkettiger Kohlenwasserstoffe (CH<sub>2</sub>). Durch die in-situ Adsorption von Wasser kann das Reaktionsgleichgewicht der thermodynamisch limitierten RWGS-Reaktion auf die Seite von CO, welches anschließend über die FT-Reaktion zum gewünschten Produkt umgesetzt wird, verschoben werden. Zudem findet eine Deaktivierung des Katalysators ab einem Partialdruckverhältnis von  $p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{H}_2} = 0.15$ , welches bei hohen Umsätzen schnell erreicht wird, statt. Durch die Hinzugabe von geeigneten Sorbenzien können höhere Umsätze ohne Deaktivierung des Katalysators ermöglicht werden. Bereits gut erforschte und kommerziell zugängliche Sorbenzien sind Zeolithe. Insbesondere die Zeolith-Typen 13X und 4A zeichnen sich durch ihre thermische Stabilität und einer vergleichsweise hohen Adsorptionskapazität bei FT-Bedingungen aus. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde eine Pseudo-First-Order-Kinetik für die Adsorption von Wasser an Zeolith 13X bei einem repräsentativen Wasserpartialdruck unter FT-Bedingungen aufgestellt. Durch anschließende Modellierung der CO<sub>2</sub>-FTS in einem stationären Rührkessel-Reaktor mit der Besonderheit der Implementierung der Sorptionskinetik konnte gezeigt werden, dass ein steigendes Zeolith-zu-Katalysator-Verhältnis den CO<sub>2</sub>-Umsatz erhöht. Jedoch wurde auch herausgearbeitet, dass die Adsorptionsgeschwindigkeit im Vergleich zu Wasserproduktionsgeschwindigkeit sehr gering ist (3-10-fache je nach Zeolith-Beladung) und somit ein hohes Zeolith-zu-Katalysator-Verhältnis nötig ist, um ausreichende Mengen an Wasser zu adsorbieren. Die experimentellen Untersuchungen der sorptionsgestützten CO<sub>2</sub>-FTS in einem Rührkesselreaktor spiegeln diese Erkenntnisse wider. Bei einem Zeolith-zu-Katalysator-Verhältnis von 2:1 konnte keine CO<sub>2</sub>-Umsatzsteigerung im Vergleich zu einer reinen Katalysatorkampagne beobachtet werden. In zukünftigen Arbeiten sollen daher alternative Sorptionsmittel betrachtet werden. Vielversprechend aber noch unerforscht in diesem Bereich sind ionische Flüssigkeiten.

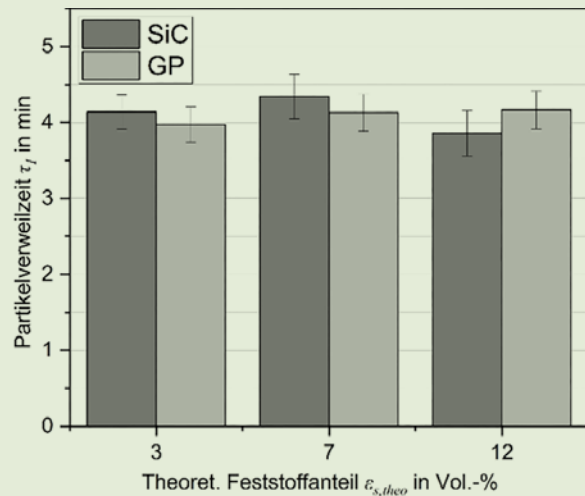
Neben den reaktionstechnischen Aspekten wird zusätzlich an einem neuen Reaktorkonzept geforscht, welches sich unter anderem für sorptionsgestützte dreiphasige Synthesen eignet.

Das Konzept besteht aus zwei miteinander verbundenen Suspensionsblasensäulen (SBS). Die Suspension setzt sich aus

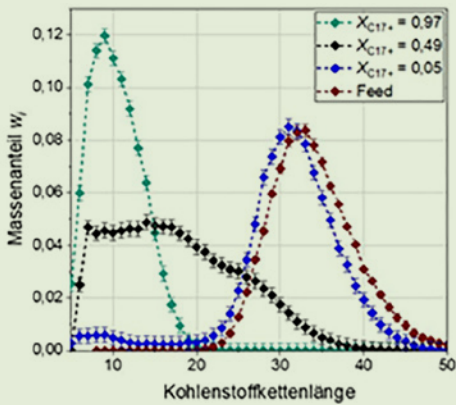
Produkt, Katalysator und Sorbens zusammen. Eine der SBS wird mit Eduktgas für die Synthese durchströmt. Durch Adsorption wird das bei der Reaktion als Nebenprodukt entstehende Wasser aus dem Produktgemisch entfernt. Das gesättigte Sorbens zirkuliert nach einer gewissen Verweilzeit in der ersten SBS zusammen mit dem Katalysator in die zweite SBS. Diese wird mit einem Regenerationsgas, z.B. H<sub>2</sub> begast, so dass das Wasser vom Sorbens desorbiert und als beladenes Gas die SBS verlässt. Anschließend zirkuliert das regenerierte Sorbens zusammen mit dem Katalysator wieder in die Reaktionsblasensäule. Die Zirkulation der Suspension zwischen den beiden SBS erfolgt hauptsächlich aufgrund von Dichteunterschieden an unterschiedlichen Stellen im Reaktor. Am Engler-Bunte-Institut wird die Fluidodynamik des neuen Reaktorkonzept mit Hilfe eines Kaltmodells, betrieben mit Wasser, Druckluft und verschiedenen Partikelarten unter Umgebungsbedingungen, untersucht. Das Kaltmodell ist ausgestattet mit Druckmessstellen und einem Coriolis-Messgerät, welche es ermöglichen, den Gasgehalt in den einzelnen SBS sowie die Dichte und den Massenstrom im Zirkulationsloop zu bestimmen. Nachdem im letzten Jahr bereits das neuartige Konzept mit experimentellen Untersuchungen im zweiphasigen System (Luft, Wasser) erfolgreich veröffentlicht wurde [1], liegt der Fokus in 2025 auf dem dreiphasigen System. In der späteren Heißenanlage sollen Partikel unterschiedlicher Dichte (z.B. Zeolith und Katalysator) zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund wurde der Einfluss der Partikeldichte auf den Gasgehalt, die Verteilung in der Anlage sowie der Verweilzeit der Partikel in den SBS untersucht. Zudem ist die Identifizierung von möglichen Engpässen in der Anlage essentiell, um mit industriellen SBS, welche mit bis zu 30 vol.% Feststoffkonzentration betrieben werden, konkurrieren zu können. Im Zuge dessen wurde in einer Masterarbeit am Kaltmodell Versuche mit zwei Partikelarten, SiC und Glasperlen, durchgeführt. Die Experimente zeigten, dass das Kaltmodell problemlos bis zu einer Feststoffkonzentration von 12 vol.% betrieben werden kann. Um höhere Feststoffkonzentrationen zu erreichen, bedarf es eine Vergrößerung des Zirkulationsloop-Durchmessers, um Druckverluste und Partikelablagerungen zu minimieren. Zudem zeigten die Experimente, dass eine homogene Verteilung beider Partikelarten in der Anlage erreicht werden kann und kein signifikanter Einfluss der Partikeldichte auf den Gasgehalt oder der Verweilzeit festzustellen war. In **Bild 1.8 li.** und **Bild 1.8 re.** sind der Gasgehalt sowie die Verweilzeit von SiC und Glasperlen (GP) für SBS1 mit einem Durchmesser von 0.1 m und einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0.2 m·s<sup>-1</sup> dargestellt. Diese Erkenntnis vereinfacht die Auslegung und den Betrieb einer potenziellen Heißenanlage. Weitere Einflussfaktoren, wie z. B. die Eigenschaften der Flüssigphase, welche auch von den Betriebsbedingungen (erhöhter Druck und Temperatur) abhängig sind, sollen in nachfolgenden Projekten untersucht werden. Zusammenfassend zeigen die Arbeiten aus dem Jahr 2025 die Eignung des neuartigen Reaktorkonzepts für dreiphasige Synthesen und legen den Grundstein für die Auslegung einer Heißenanlage.



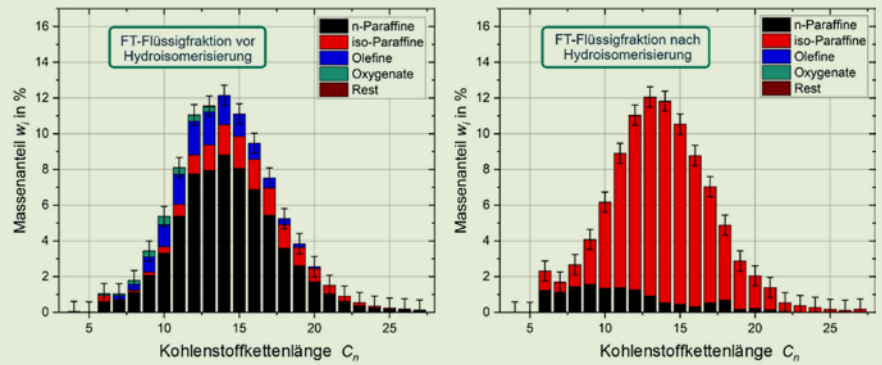
**Bild 1.8 li.:** Gasgehalt bei verschiedenen Partikeldichten, mit Silicium-Carbid (SiC) und Glasperlen (GP)



**Bild 1.8 re.:** Partikelverweilzeit bei verschiedenen Partikeldichten, mit SiliciumCarbid (SiC) und Glasperlen (GP)



**Bild 1.9:** Feed- und Produktzusammensetzung einzelner Hydrocracking-Experimente bei unterschiedlichen Wachsumsätzen  $X_{C_{17+}}$ .



**Bild 1.10:** Feed und Produktzusammensetzung bei der Hydro-Isomerisierung der FT-Flüssigfraktion

Die Forschungsarbeiten zum neuen Reaktorkonzept für die sorptionsgestützten  $CO_2$ -FTS werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Frau Wiebke Asbahr 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 Bereitstellung von nachhaltigen flüssigen Treibstoffen (Sustainable Aviation Fuels - SAF) erfolgt hauptsächlich durch Biomass-to-Liquid (BtL) und Power-to-Liquid (PtL) Verfahren. Diese erfordern jedoch weitere Aufarbeitung, um normgerechte Flugtreibstoffe zu erhalten. Hydroprocessing-Verfahren sind entscheidend für die Herstellung von SAF und beinhalten verschiedene katalytische Reaktionen wie Hydrotreating, Hydroisomerisieren und

Hydrocracking. Am EBI werden an einer Hydroprocessing-Anlage 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.

Im Jahr 2025 lag der Fokus auf der Konversion von Fischer-Tropsch-Produkten zu SAF. Cashewnussschalen wurden bei BEST in Wien über ein Zweibettwirbelschichtverfahren zu Synthesegas umgewandelt und anschließend über eine FT-Synthese in langkettige paraffinische Kohlenwasserstoffe umgesetzt. Zur Verbesserung der Siede- und Kaltfließ-eigenschaften wurden die Rohprodukte am Engler-Bunte-Institut via Hydroprocessing in normgerechte Flugtreibstoffe gewandelt. Die erzeugte FT-Wachsfraktion wurde via Hydrocracking in den gewünschten Kettenlängen- und damit

Siedebereich konvertiert, während der Gefrierpunkt der erzeugten FT-Flüssigfraktion via Hydro-Isomerisierung in den normgerechten Bereich gebracht wurde (vgl. **Bild 1.9** [2] und **Bild 1.10** [3]).

Forschungsfokus lag bei den experimentellen Arbeiten hauptsächlich auf den möglichen SAF-Ausbeuten und Selektivitäten. Ziel war es eine möglichst hohe SAF-Selektivität zu erreichen und die Bildung von Koppelprodukten wie Naphtha und Crackgasen zu minimieren. Weiterer Forschungsfokus lag auf der Prozesssteuerung über die Betriebsbedingungen beim Hydroprocessing sowie der Modellierung der experimentellen Ergebnisse über statistische (Response Surface Method via Design of Experiments) und physikalische (Diskretes Lumping) Ansätze. Durch die Wahl von optimalen Bedingungen konnten um die 10 L SAF produziert werden. Ein akkreditiertes Labor zertifizierte die Erfüllung aller Eigenschaften nach ASTM-D7566, welche die Qualitätsanforderungen für synthetische Flugtreibstoffe festlegt.

Im Zuge des REF4FU-Projekts wurden im Jahr 2025 außerdem die Arbeiten zur Aufarbeitung der Schwerbenzinfraction des Methanol-to-Gasoline (MtG)-Prozesses zu einer Kerosinblendingkomponente fortgeführt. Das erfolgreiche Upgrading der Schwerbenzinfraction der MtG-Prozesskette kann die Flexibilität, Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit einer Grünen Raffinerie der Zukunft maßgeblich steigern. Das Upgrading über Ringspaltung kann eine Verbesserung der Rußbildungseigenschaften im Vergleich zum Aromaten reichen Rohprodukt mit sich bringen, führt jedoch zur Verschlechterung der Stoffeigenschaften im Hinblick auf Siedekurve und Dichte. Forschungsergebnisse am Engler-Bunte-Institut zeigen die mögliche Herstellung eines cyclo-Paraffin-reichen Raffineriestroms durch milde Hydrierung. Aufgrund von niedrigen Flammpunkten eignen sich 60 Vol.% für eine Kerosinblending-Fraktion, während die restlichen 40 Vol.% als Blendingkomponente für Benzin genutzt werden können.

Im Jahr 2026 soll sich der Fokus in Richtung Hydroprocessing von Pyrolyseölen aus Plastikabfällen richten. Zielprodukt ist erneut ein normgerechter Flugtreibstoff.

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

- [1] *Asbahr, W.; Lamparter, R. and Rauch, R.; ChemEngineering, 2024, 8, 52.*
- [2] *Scherer, J.; Untersuchungen zu optimiertem Hydrocracking von Fischer-Tropsch-Wachsen zu Flugtreibstoff, Masterarbeit (2025).*
- [3] *Irvine, R.; Untersuchungen und Optimierung zum Hydroisomerisieren von Fischer-Tropsch-Crude zur Herstellung von Flugtreibstoff, Masterarbeit (2025).*

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

Moritz Wolf, Asad Asadli, Angelina Barthelmeß, Jakob Biesinger, Christian Ebel, Elisabeth Herzinger, Cherie Hsu, Mohamad Moslemani, Fabian Neumann

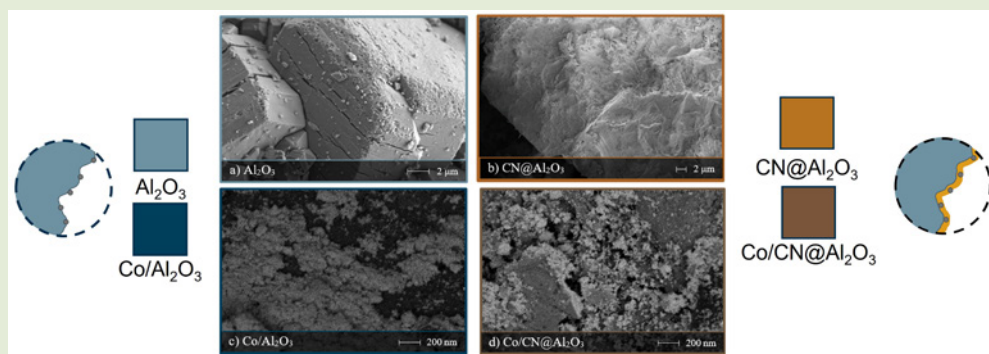
Die Arbeitsgruppe „Materialsynthese und Scale-up“ von TT-Prof. Dr. Moritz Wolf (EBI-ceb, Professur Katalysatormaterialien für die Energiewende) ist am Institut für Katalyseforschung und -technologie (IKFT) am Campus Nord des KIT tätig. Der Schwerpunkt der Arbeitsgruppe liegt auf der Entwicklung von Katalysator- und Reaktortechnologien für die chemische Energiespeicherung und Synthese nachhaltiger Grundchemikalien als wesentliches Kernelement einer erfolgreichen Energie- und Rohstoffwende. In 2025 wurde die Forschungsarbeit von TT-Prof. Dr. Moritz Wolf mit einer Einladung zu einem Forschungsartikel in der digitalen Spezialausgabe „Catalysis Talents“ des Journals ChemCatChem gewürdigt [1]. Die enge Zusammenarbeit mit der chemischen Industrie (z. B. Clariant, Sasol, INERATEC, Hydrogenious LOHC Technologies) sowie nationalen und internationalen Partnern (z. B. Forschungszentrum Jülich, Helmholtz-Zentrum Berlin, Imperial College London, Universität Kapstadt, Universität Padua) ist dabei essenzieller Bestandteil der Forschungsarbeit. So war die Arbeitsgruppe von A/Prof. Antonio Del Rio Chanona am Imperial College London, welcher 2025 ein Fakultätskolloquium bei der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik gehalten hatte, Gastgeber einer KIT-Masterarbeit zur Entwicklung einer Bayes'schen Optimierung von Katalysatorzusammensetzungen.

#### **Kohlenstoffnitrid modifizierte Trägermaterialien für die Methanisierung von CO<sub>2</sub>**

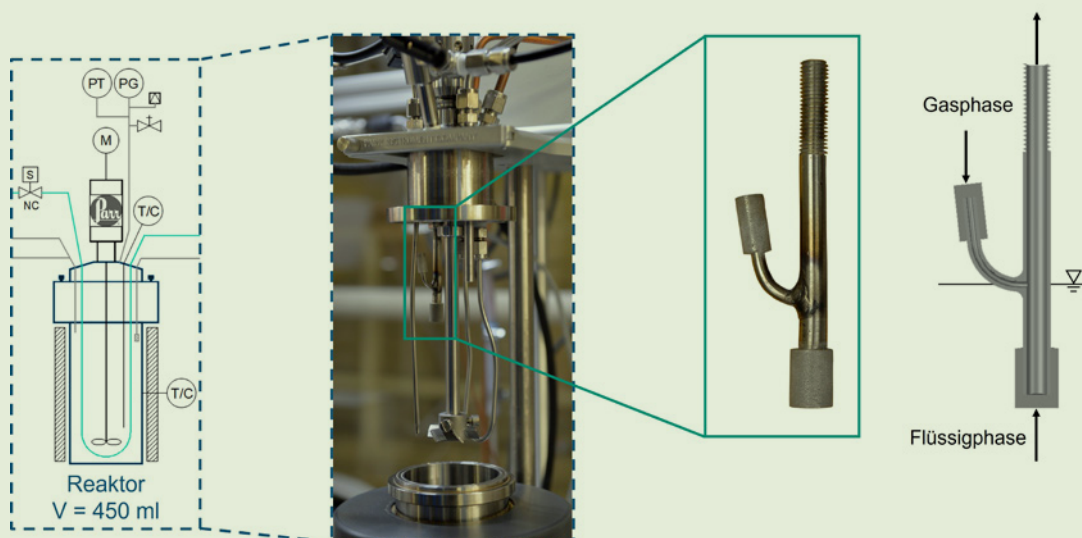
Die Modifizierung von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Trägermaterialien mit Kohlenstoffnitrid (CN@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ermöglicht die selektive Reduktion von CO<sub>2</sub> zu Methan für Kobalt basierte Katalysatoren. Durch die Beschichtung (**Bild 1.11**) wird, im Gegensatz zu reinen Kohlenstoffnitridmaterialien, der Druckverlust in Festbettreaktoren reduziert. Die Modifikation führt zu einer gleichmäßigeren Verteilung und verbesserten Stabilisierung von Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Nanopartikeln, welche vor der katalytischen Anwendung zu metallischem Kobalt reduziert werden müssen. Bei der CO<sub>2</sub>-Methanisierung erzielte ein Co-/CN@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Katalysator eine Methan-selektivität von bis zu 94 %, während der herkömmliche Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Katalysator lediglich 66 % Selektivität erreicht [1]. Die verbesserte katalytische Leistungsfähigkeit geht mit einem deutlich erhöhten Umsatz aufgrund einer Aktivierungsphase einher, welche vom entsprechenden Wechsel der Selektivität hin zum Zielprodukt Methan begleitet wird.

#### **Induktive Beheizung von Katalysatoren**

Dieses Projekt im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 1441 TrackAct (<https://www.trackact.kit.edu/>) erforscht die Induktionsbeheizung von Katalysatoren als dynamisches Heizkonzept für grundlegende Studien und die technische Anwendung. Empfängermaterialien für die Induktionsbehei-



**Bild 1.11:** Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und dem modifizierten  $\text{CN}@/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Trägermaterialien ohne (a-b) und mit (c-d)  $\text{Co}_3\text{O}_4$ -Nanopartikeln



**Bild 1.12:** Detailsicht des Gas-Flüssig-Auslasses im kontinuierlichen dreiphasigen Rührkessel-Slurry-Reaktor zur technischen Dehydrierung von LOHCs

zung werden in Trägerkatalysatoren für die Emissionskontrolle integriert, was eine schnelle Aufheizung aufgrund der Wärmeentstehung im Katalysatorbett ermöglicht. Empfängermaterialien wurden in Kollaboration mit der Universität Padua optimiert und durch ihre gleichzeitige Eignung als Katalysator für die CO-Oxidation in innovativen Studien mit direkt induktiver Beheizung getestet. Der Aufbau zur Testung der Materialien. Darüber hinaus wurde die kontrollierte Beheizung mit 1 mm Stahlkugeln systematisch untersucht, um gezielt Temperaturprogramme abfahren zu können.

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

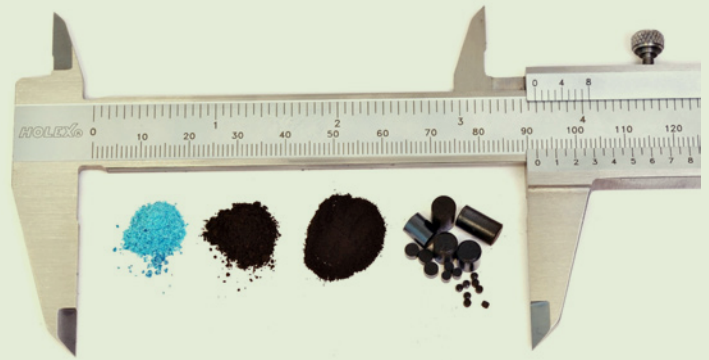
LOHCs ermöglichen eine sichere, skalierbare Speicherung und den Transport von Wasserstoff, wobei die technische Dehydrierung aufgrund ihrer endothermen Natur und langsamen Kinetik besonders herausfordernd ist. In 2025 wurden erstmals Forschungsprojekte mit einem kontinuierlichen, dreiphasigen Rührkessel-Slurry-Reaktor (**Bild 1.12**) für das LOHC Benzyltoluol abgeschlossen [2]. Die gezielte Optimierung von Rührgeschwindigkeit, Dosierate und Temperatur ermöglicht eine stabile, effiziente und reversible Wasser-

stofffreisetzung sowie die Beladung mit gasförmigem Wasserstoff. Ein Test im Langzeitbetrieb bei technisch relevanten Bedingungen stellte die Eignung des Systems durch eine stabile Phasentrennung, konstante Katalysatoraktivität und minimale LOHC-Degradierung unter Beweis. Restart-Tests belegen, dass mechanische Durchmischung die Leistung effektiv wiederherstellt, wobei häufige Ein-Aus-Zyklen die Stabilität jedoch leicht beeinträchtigen. Der Reaktor löst somit zentrale Probleme der Dehydrierung von LOHCs: die Entnetzung des Katalysators, Wärmemanagement und Volumenexpansion durch Wasserstofffreisetzung. In der kontinuierlichen Hydrierung, der Beladung des LOHCs mit Wasserstoff, konnte eine zu 99,8 % vollständige Beladung in einem einzigen Durchsatz erzielt werden.

#### **Autonome Katalysatorentwicklung mittels Bayes'scher Optimierung**

Die Aktivität, Selektivität und Langzeitstabilität eingesetzter Katalysatoren sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses. In vielen Anwendungen besteht erhebliches Optimierungspotenzial hinsichtlich der Zusammensetzung des Katalysators, um diese Leistungskriterien zu erzielen. Die

**Bild 1.13:** Kogefälltes Ausgangsmaterial (AG Dr. Stephan Pitter, IKFT, KIT), kalzinierter Pulverkatalysator, fließfähiger Pulverkatalysator und verschiedene Tablettengeometrien (von links nach rechts) eines kupferbasierten Katalysators für die Methanolsynthese



Bayes'scher Optimierung stellt einen vielversprechenden Ansatz zur effizienten Optimierung des hochdimensionalen Parameterraums rund um das Katalysatordesign dar, welcher bei gleichzeitig minimalem experimentellem Aufwand zielorientiert erkundet wird. Durch die Kombination von wissensbasierten Ansätzen und iterativer Modellanpassung lassen sich optimale Materialzusammensetzungen systematisch identifizieren. Die Bayes'sche Optimierung eröffnet somit eine datengetriebene, präzise Materialoptimierung in der Katalysatorentwicklung. Im Helmholtz-Projekt „Innovationspool – Auf dem Weg zur autonomen Materialentwicklung“ wurden auf Basis experimenteller Daten verschiedene Bayes'scher Optimierungsalgorithmen (weiter)entwickelt und eingesetzt, um neue Katalysatorkandidaten vorzuschlagen.

#### **Tablettierung von Katalysatoren**

In industriellen Reaktoren werden technische Katalysatoren eingesetzt, die im Vergleich zur akademischen Forschung neben guten katalytischen Eigenschaften auch anderen ökonomischen und technischen Anforderungen gerecht werden müssen. In der heterogenen Katalyse werden meist Katalysatorformkörper bevorzugt, um u. a. hohe Druckverluste zu vermeiden. Eine Methode, um Formkörper mit hoher mechanischer Stabilität und einheitlicher Form herzustellen, ist die Tablettierung, bei der der Katalysator unter hohem Druck in Form gepresst wird. Im aktuellen Projekt wird ein kupferbasierter Katalysator für die Methanolsynthese untersucht (Bild 1.13), welcher unter Zusammenarbeit des IKFT und des Instituts für Thermische Verfahrenstechnik (TVT) großskalig hergestellt wird. Die Formgebung erfolgt in einer hochinstrumentierten Tablettierungsmaschine für die kontinuierliche Produktion bei gleichzeitiger Aufzeichnung einer Vielzahl von Daten. Die erzielten Einblicke und Tagungsbeiträge führten in 2025 zu zahlreichen neuen Kontakten in die Industrie, welche in separaten Treffen vertieft und zukünftig strategisch ausgebaut werden sollen.

[1] Barthelmeß, A.; Wambo, Tchatchou, A.J.; Zimmermann, M.; Trouillet, V.; Wolf, M.; ChemCatChem 2026, 18 (1), e00506.

[2] Herzinger, E.; Berger, J.; Wolf, M.; Chem. Eng. J. 2026, 534, 175168.

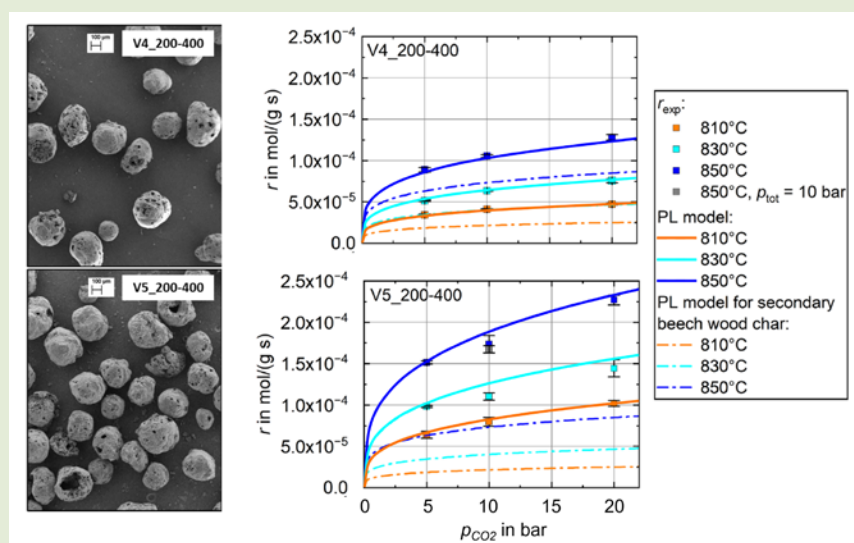
#### 1.5.4 Arbeitsgruppe „Thermo-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung“

Thomas Kolb, Frederik Scheiff, Manuel Haas, 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 „Materials and Technologies for the Energy Transition“ (MTET) mit Forschungsthemen zur Flugstromvergasung. Das EBI ceb unterstützt diese anwendungsbezogenen Arbeiten an Technikums- und Pilotanlagen im Campus Nord 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 sowie biogener und abfallbasierter Pyrolyseöle.

Bei der Vergasung von flüssigen Brennstoffen und Suspensionsbrennstoffen im Flugstromreaktor wird der fein zerstäubte Brennstoff in eine Flammenzone eingebracht. Die Brennstofftropfen unterlaufen in der Flamme komplexe physikalische und thermochemische Teilprozesse in oxidierender und reduzierender Atmosphäre bei hohen Drücken und Temperaturen. In der Flammenzone werden die Brennstofftropfen zunächst erhitzt, dabei verdunsten zuerst niedrig siedende Komponenten, während sich höher siedende Komponenten an der Oberfläche der Brennstofftropfen anreichern. Bei der Verdunstung der höhersiedenden Komponenten kann parallel eine pyrolytische Zersetzung dieser Komponenten ablaufen. Dies kann zur Bildung einer festen Schale führen, wodurch sphärische, feste Agglomerate (Cenosphären) entstehen können. Diese benötigen aufgrund der langsameren heterogenen Gas-Feststoff-Reaktionen eine höhere Verweilzeit zur vollständigen Umsetzung im Vergleich zum Brennstoffdampf. Das Verständnis der Bildungs- und Abbauvorgänge dieser festen Zwischenprodukte in Abhängigkeit der Prozessbedingungen und Brennstoffspezifikationen ist daher entscheidend für die Auslegung und den effizienten Betrieb von Flugstromvergäsern.

In früheren Versuchen am Hochdruckflugstromvergaser (HP-EFG) des KIT im Rahmen des bioliq®-Projekts wurden



**Bild 1.14 li:** REM-Aufnahmen der aus der Wasserquenche abgetrennten Cenosphären aus der HP-EFG-Pilotanlage mit Holzpyrolyseöl (V5) und Holzpyrolyseöl mit 10 m-% Holzkoks (V4) der Größenklasse 200 – 400 µm. **Bild 1.14 re.:** Reaktionsgeschwindigkeit der CO<sub>2</sub>-Vergasung der jeweiligen Cenosphären bei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Partialdrücken und Temperaturen.

Experimente mit einem Holzpyrolyseöl (V5) sowie einer Suspension aus Holzpyrolyseöl und 10 m-% Holzkoks (V4) bei einem Prozessdruck von 40 bar durchgeführt. Zur Erzeugung großer Mengen von Cenosphären als Zwischenprodukt wurde der Vergaser gezielt bei einer niedrigen Luftzahl von  $\lambda = 0,35$  betrieben. In beiden Versuchen wurden aus der Wasserquenche des Flugstromvergasers Proben entnommen und daraus die nicht umgesetzten festen Zwischenprodukte abgetrennt. Im Rahmen der Promotion von Stella Walker werden die gewonnenen Cenosphären charakterisiert. Die Partikel werden nach Partikelgröße fraktioniert und mittels verschiedener analytischer Methoden (Chemische Analyse, SEM, EDXS, XRD, Physisorption und  $\mu$ -CT) umfassend beschrieben. Ein Fokus lag hierbei auf der Analyse der inneren Porenstruktur der Cenosphären. Die Reaktionskinetik der Cenosphären wurde in einem am Institut entwickelten differentiellen Festbettreaktor (dFBR) für CO<sub>2</sub>-Partialdrücke bis 20 bar ermittelt [1]. Der dFBR ermöglicht es, den Einfluss von Konzentrationsgradienten im Probenbett auf die experimentell ermittelte Reaktionsgeschwindigkeit zu vernachlässigen und somit die Mikrokinetik der Vergasungsreaktionen zu bestimmen [2]. In weiteren Arbeiten wurde das Umsatzverhalten des in den HP-EFG-Versuchen verwendeten Holzpyrolyseöls charakterisiert [3]. Dabei wurden unter anderem die Kinetik der Sekundärpyrolysereaktionen des Öls mittels Thermogravimetrie unter N<sub>2</sub>-Atmosphäre und Aufheizraten zwischen 2 und 50 K/min ermittelt.

Die aus der HP-EFG-Pilotanlage gewonnenen Cenosphären weisen eine annähernd kugelförmige Gestalt auf und zeigen Öffnungen an der Außenwand (Bild 1.14). Diese resultieren aus einem auf die Schalenbildung folgenden Druckanstieg im Inneren, der im Lauf der Umsetzung zu einem Aufplatzen der Schale führt. Die Analyse der Inneren Morphologie zeigt eine große Bandbreite an Strukturen. Schwammähnliche Struktu-

ren und größere Hohlräume im Makroporenbereich bis hin zu Längenskalen ähnlich der Größe der Cenosphären wurden beobachtet. Die Cenosphären aus den Versuchen mit der Holzpyrolyseöl-Holzkoks-Suspension (V4) zeigen zudem in die Matrix eingeschlossene Holzkokspartikel. Neben den Makroporen konnten bei den Cenosphären aus beiden Experimenten auch Mesoporen beobachtet werden, welche für die gekoppelten Stoffübergangs- und Reaktionsvorgänge in den Partikeln relevant sind. Aufgrund der Holzkokspartikel weisen die Cenosphären aus V4 im Gegensatz zu den Cenosphären aus den Versuchen mit reinem Holzpyrolyseöl auch Mikroporen auf [1].

In den Versuchen am differentiellen Festbettreaktor wurde die Vergasungskinetik mit CO<sub>2</sub> untersucht. Verschiedene Größenfraktionen (200-400 µm, 600-800 µm) der Cenosphären aus V4 und V5 wurden bei CO<sub>2</sub>-Partialdrücken bis 20 bar und Temperaturen zwischen 810 und 850 °C untersucht. In den Versuchen zeigten alle Cenosphärentypen eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit als der reine in V4 beigemischte Buchenholzkoks (Bild 1.14). Die Ergebnisse konnten über einen Potenzansatz mit guter Genauigkeit beschrieben werden [1].

Die Tendenz zur Feststoffbildung des verwendeten Holzpyrolyseöls wurde weiter mittels Thermogravimetrie untersucht. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Zersetzung und die Verdampfung des Öls überlagert ablaufen. Aus den Experimenten wurde eine Kinetik abgeleitet, die zur Beschreibung der Flugstromvergasung des Holzpyrolyseöls verwendet werden kann [3]. Die Kinetik sowie die in der Arbeit bestimmten Stoffparameter werden sowohl für die CFD-Simulation des Flugstromvergasers als auch für die Beschreibung der Flammezone mittels eines auf der Freistrahtheorie basierenden Simulationsmodells (2-Phasen-Freistrahmodell) genutzt, das im Rahmen der Promotion von Manuel Haas weiterentwickelt wird [4].

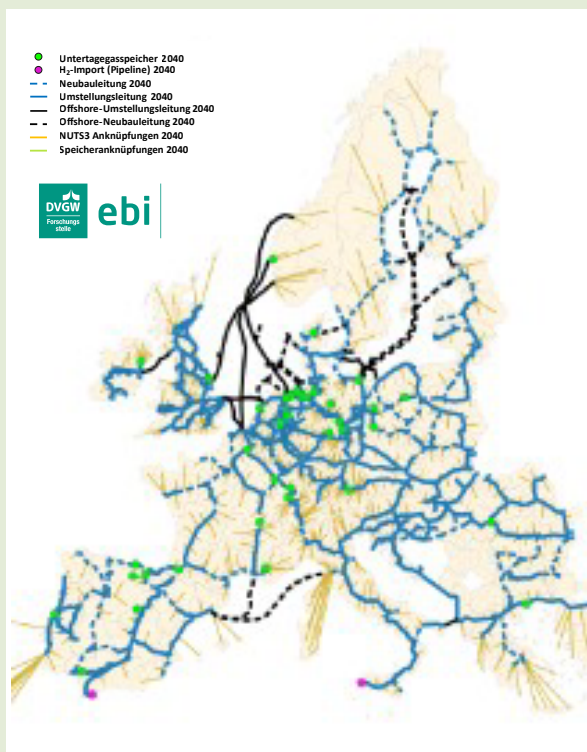
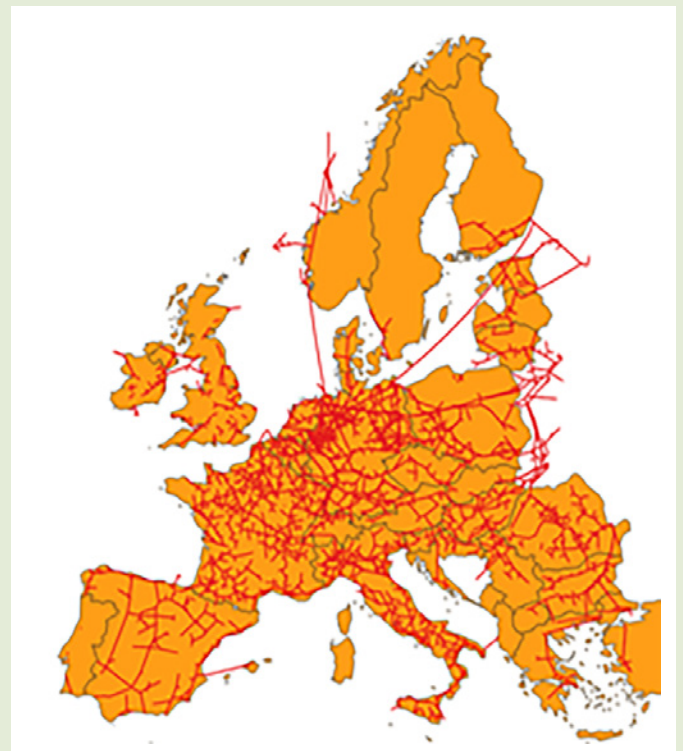


Bild 1.15: Wasserstoff- (li.) und Methantransportnetz (re.) 2040



Weiterführende Arbeiten konzentrieren sich auf die Untersuchung der Vergasungskinetik der Cenosphären bei Mischungen von Wasserdampf und  $\text{CO}_2$  unter technisch relevanten Drücken. In vorangegangenen Arbeiten konnte gezeigt werden, dass unter diesen Bedingungen Effekte auftreten können, die nicht durch die Superposition der berechneten Reaktionsraten der Einzelkomponenten abgebildet werden können [2]. Gegenstand weiterer Untersuchungen wird auch die Umsetzung kunststoffbasierter Pyrolyseöle unter Vergasungsbedingungen sein.

- [1] Walker, S.; Nather, M.; Ullrich, A.; Umeki, K.; Kolb, T.; *Cenospheres from Entrained Flow Gasification – Characterization and pressurized  $\text{CO}_2$  gasification kinetics*, (in preparation).
- [2] Walker, S.; Kolb, T.; *Pressurized Gasification of Beech Wood Char in Steam and Steam- $\text{CO}_2$  Mixtures: Kinetics Considering Steam- $\text{CO}_2$  Interaction*. Energy Fuels 2025. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c04287>.
- [3] Dammann, M.; Hüsing, F.; Santo, U.; Böning, D.; Mancini, M.; Kolb, T.; *Characterisation of beech wood pyrolysis oil: Chemical and physical properties and decomposition kinetics*. Fuel 2026; 404:134897. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134897>.
- [4] Haas, M.; Fleck, S.; Scheiff, F.; Kolb, T.; *Conversion of suspension fuel droplets in the flame zone of an entrained flow gasifier*. Fuel 2026; 416:138473. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.138473>.

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

### 1.6.1 Arbeitsgruppe „Systeme und Netze“

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

In der Arbeitsgruppe Systeme und Netze liegt ein Schwerpunkt auf der Entwicklung von Konzepten zur Transformation von u. a. Energiesystemen, Entwicklung und Bewertung von kommunalen Wärmepfanungen und Nutzung von EE-Strom. Dafür werden systemisch die techno-ökonomischen und ökologischen Aspekte der Sektorenkopplung mit den detaillierten Energieinfrastrukturen und politischen sowie regulatorischen Rahmenbedingungen gekoppelt. Zur Beantwortung der Fragestellungen in diesem Schwerpunkt werden u. a. digitale und synthetische Zwillinge auf Basis von KoSy Energy Solutions sowie Verteilnetze (Wärme, Methan, Strom, Wasserstoff) entwickelt. Die Transportnetze Gas (Methan und Wasserstoff) wurden entsprechend der neuesten Netzentwicklungspläne für Europa aufgebaut (s. Bild 1.15) und für unterschiedlichste Szenarien analysiert, um deren systemischen Einfluss auf die Entwicklung des Wasserstoff- bzw. Methanbedarfs zu beschreiben. Beispielhaft wird in Bild 1.16 für das

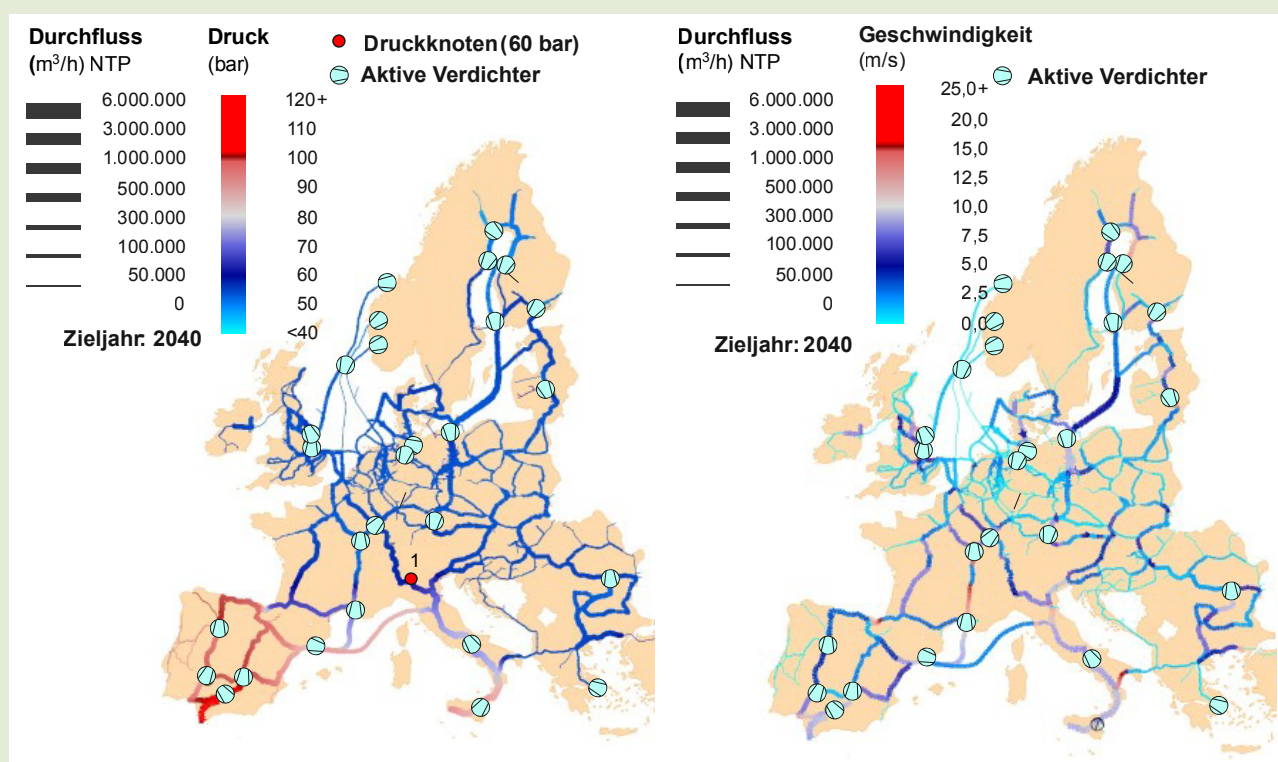


Bild 1.16: Druck und Durchfluss (li.), Geschwindigkeit und Durchfluss (re.) für eine: maximale Abnahme

Szenario, bei dem Wasserstoff im Wesentlichen aus der Region Nordafrika und Marokko nach Europa gelangt, die Limitierung des Wasserstofftransportnetzes aufgezeigt. Somit sind Rückschlüsse für den Wasserstoffhochlauf aus physikalischer Sicht möglich.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Evaluierung der Nutzungsmöglichkeiten sowie der Pfadanalysen für regenerative Gas wie Biomethan und Wasserstoff sowie dessen Derivate. Wesentlicher Bestandteil aller Analysen ist der Realitätscheck und somit die enge Verzahnung mit der Praxis. Diese spiegelt sich z.B. in der Beratung bei Einspeiseprojekten für Biomethan und Wasserstoff sowie der Umstellung von Erdgasnetzen auf Wasserstoff wider.

Die Arbeitsfelder der AG Systeme & Netze werden um die systemische Betrachtung von Carbon Capture and Storage/Utilisation (CCS/U) sowie Carbon Looping ergänzt, beispielsweise um  $\text{CO}_2$  aus erneuerbaren Quellen für die Herstellung von RFNBO (erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischer Herkunft) nutzbar zu machen. Ergänzend konnten erfolgreich zwei Auditoren für Wasserstoff und RFNBO ausgebildet werden, die zukünftig in Zusammenarbeit mit DVGW CERT Zertifizierungen durchführen sollen. Im Rahmen der Aktivitäten zur Nutzung von Wasserstoff wurde die Auswirkung der Delegierten-Verordnung (EU 2025/2359) auf die Anrechenbarkeit von blauem und türkischem Wasserstoff als kohlenstoffarm untersucht. Diese etabliert erstmals einen unionsweit harmo-

nisieren und rechtsverbindlichen Rahmen zur Bewertung der Treibhausgaseinsparungen kohlenstoffarmer Brennstoffe. Die Analyse zeigt, dass die Einhaltung des Low-Carbon-Grenzwerts von  $28,2 \text{ g CO}_2\text{-eq/MJ}$  maßgeblich von den Erdgasvorkettenemissionen (s. beispielhaft Bild 1.17), der  $\text{CO}_2$ -Abscheiderate sowie von der THG-Intensität der eingesetzten elektrischen Energie abhängt. Bereitstellungspfade mit hohen Vorkettenemissionen, insbesondere LNG, erweisen sich als nicht geeignet für die Erzeugung von Low-Carbon-Wasserstoff im Sinne der EU-Regulierung (s. beispielhaft Bild 1.18). Für türkischen Wasserstoff kann vereinfacht festgestellt werden, dass er nur bei einer dauerhaften Entsorgung des abgeschiedenen Kohlenstoffs und einer sehr geringen THG-Emission des eingesetzten Stroms als kohlenstoffarm gilt.

Erfolgreich war zudem das Ausrollen des im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelten Modellierungswerkzeuges KoSy Energy Solutions für die systemische Analyse von Energiesystemen in die Beratung. Erste Stadtwerke zeigen Interesse, sodass beispielsweise Projekte zum Wärmenetzausbau, zur Wasserstofftauglichkeit von Erdgasnetzen und sowie zu Quartiersanalysen umgesetzt wurden.

Als wichtiger Meilenstein für die Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas oder Biomethan ist das Umsetzungsprojekt H2Ried der Energienetze Bayern zu nennen, in dem ein Verteilnetz mit ca. 2.600 Verbrauchern auf die Zumischung bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff umgestellt wird. In Zusammenarbeit

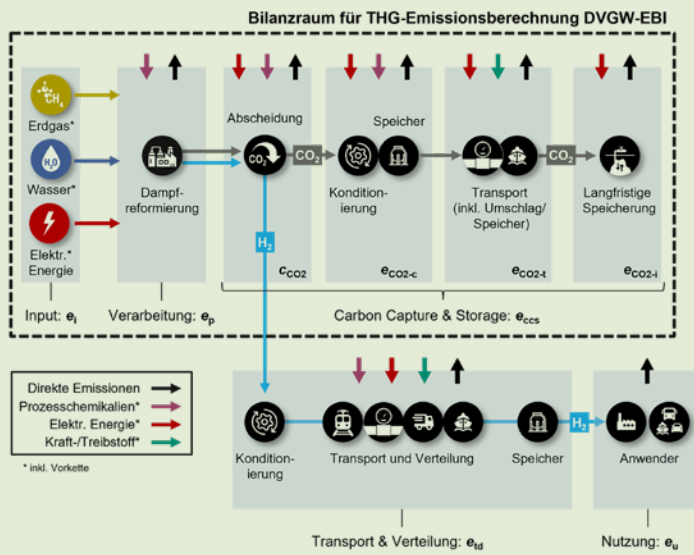


Bild 1.17: Vereinfachte Darstellung der Prozesskette für die Bereitstellung von blauem Wasserstoff

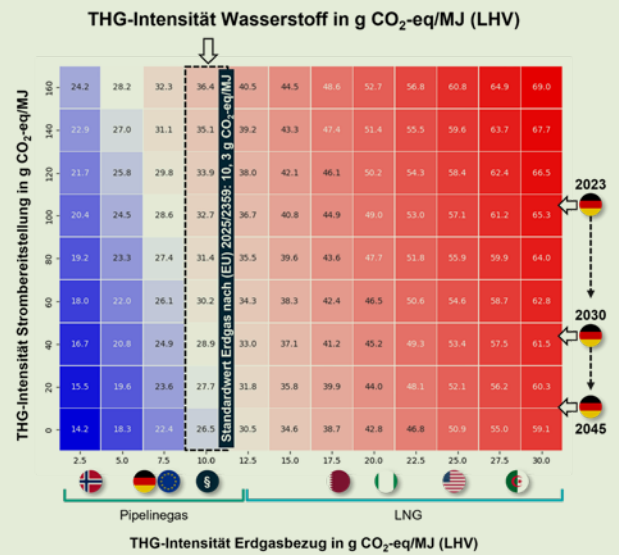


Bild 1.18: THG-Emissionen von blauem Wasserstoff („Well-to-Gate“) bei einem Abscheidepotential CO<sub>2</sub> von 95 %

mit der Arbeitsgruppe Gasanwendungen wird die Wasserstofftauglichkeit der vorgelagerten Transportleitung, der GDRM-Anlagen des Verteilnetzes und des TRGI-Bereichs in den Haushalten, Gewerben und Industrien geprüft.

Darüber hinaus organisierte die AG SN 2025 zusammen mit dem AGFW und dem Fraunhofer Umsicht vier Online-Veranstaltungen im Rahmen der seit 2021 laufenden Webinars SW.aktiv mit 200-300 Teilnehmenden pro Veranstaltung sowie mit der IHK Karlsruhe zwei Online-Veranstaltungen für die Webinarreihe „Unternehmen.Zukunft“ für die mittelständische Industrie.

Verstetigt werden konnte auch die Zusammenarbeit mit dem KIT im Programm Energiesystemdesign (ESD) auf den die Themengebieten Gastransport- und -verteilnetze, lokale Energiesysteme und CO<sub>2</sub> ausgebaut werden.

Ebenfalls erfolgreich konnte das BMW-finanzierte Forschungsvorhaben „Regionale THG-Null-Strategien am Beispiel der Modellregion Oberschwaben (RegioTransH2O)“ abgeschlossen werden. In diesem Projekt wurde die Transformation des Energiesystems auf regionaler Ebene in den vier Landkreisen Alb-Donau Kreis, Biberach, Sigmaringen und Ravensburg unter Berücksichtigung aller relevanten Sektoren, Energieträger und Netzinfrastrukturen untersucht. Dafür wurden mit KoSy Energy Solution detaillierte Simulationen der regionalen Strom-, Wärme- und Gasinfrastrukturen durchgeführt. Eingeflossen sind detaillierte Netzdaten der beteiligten Partner Netze BW GmbH, Netze-Gesellschaft Südwest mbH und e.wa riss Netze GmbH. Des Weiteren wurden einzelne regionale Entwicklungen mit den Langfristszenarien des BMW (O45-Strom und O45-H<sub>2</sub>) und statistischen Daten

zu z. B. Wohnen, Verkehr und Industrie von Deutschland, Baden-Württemberg und den Landkreisen zu regionalen Szenarien verschnitten. Somit konnten häuserscharfe Energiebedarfe, industriescharfe Abwärmen und lokale Energieerzeugungen verortet und den geobasierten Energienetzen zugeordnet werden, sodass ein multimodales Energiesystemmodell zur Analyse des sektorübergreifenden Energiesystems für die betrachteten Landkreise, aufgeteilt in Gemarkungen, abgebildet werden konnte.

Ein Ergebnis war, dass Power-to-Gas-Anlagen insbesondere für Industrieprozesse lokal Wasserstoff bereitstellen können. Regionale Elektrolyseure könnten 2045 bilanziell 830 GWh/a (Gasszenario) bzw. 881 GWh/a (Stromszenario) H<sub>2</sub> pro Jahr im beispielhaften Landkreis Biberach erzeugen (siehe Bild 1.19 und Bild 1.20). Dies übersteigt den Wasserstoffbedarf von 576 GWh/a (Gasszenario) bzw. 177 GWh/a (Stromszenario). Durch den zeitlichen Versatz von Wasserstoffbedarf und Erzeugung wird für die Speicherung ein Wasserstoffnetz benötigt, in das überschüssiger bzw. fehlender Wasserstoff eingespeist bzw. entnommen werden kann. Auch zeigt sich, dass in dem Stromszenario auch ein signifikanter Strombezug aus und eine Stromeinspeisung in das vorgelagerte Stromnetz stattfindet.

Ferner zeigte die Analyse des Stromnetzes, dass bereits heute ca. 8 % der Leitungen an der Kapazitätsgrenze sind, und bis 2030 ein Großteil der Leitungen aufgerüstet werden müsste, um Abschaltungen von EE-Anlagen zu vermeiden. Auch konnte gezeigt werden, dass PtG-Anlagen den Netzausbau unterstützen, jedoch bei Weitem nicht vollständig ersetzen können.

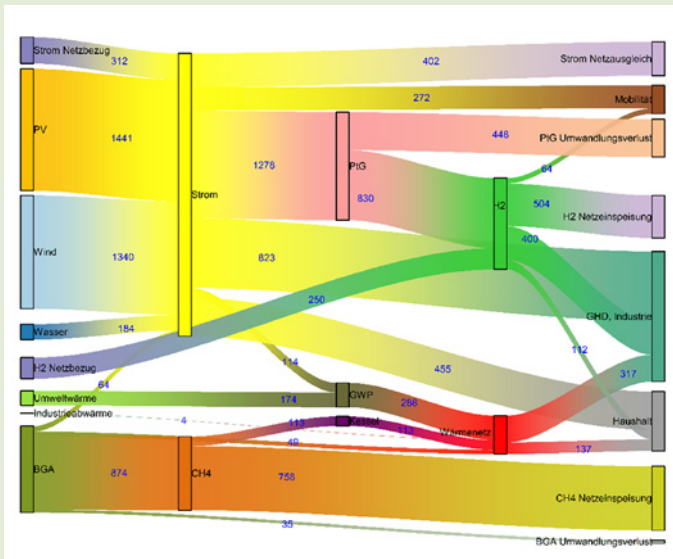


Bild 1.19: Energieflüsse Landkreis Biberach 2045 Gasszenario in GWh

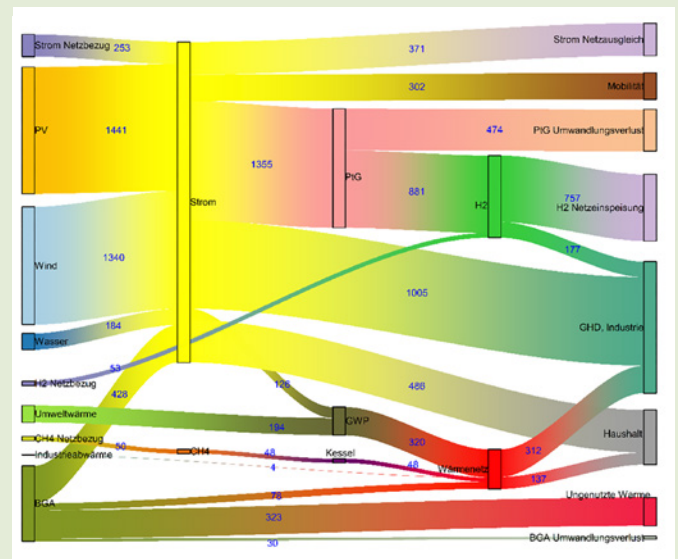


Bild 1.20: Energieflüsse Landkreis Biberach 2045 Stromszenario in GWh

1.6.2 Arbeitsgruppe „Verfahrenstechnik“

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

Die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik (Team VT) erarbeitet verfahrenstechnischen Lösungen und Konzepte für die Bereitstellung von klimafreundlichen Molekülen. Durch anwendungsnahe Forschung sollen umsetzbare technische Lösungen der Praxis zur Verfügung gestellt und wichtige Informationen an die Entscheidungsträger herangetragen werden, um damit den Markthochlauf zu unterstützen.

Thematisch befasst sich das Team VT mit:

- der Bereitstellung klimafreundlicher Energieträger über PtX: Methan, Wasserstoff, Wasserstoff-Derivate
- Biogas, Biomethan und SNG aus Biomasse
- dem CO<sub>2</sub>-Management (Abtrennung, Aufbereitung, Transport, CCU und CCS)
- der Verfahrenstechnik im Bereich Gastransport und -anwendung (z. B. adsorptive Aufbereitung)

Die Arbeiten umfassen sowohl experimentelle Arbeit vom Labormaßstab bis in den Pilotanlagenmaßstab sowie theoretische Arbeiten zur technischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung von Technologien und Prozessketten. Hierbei werden die Bewertungen u. a. auf Basis von stationären und instationären Prozessmodellierungen durchgeführt. Im Folgenden werden beispielhaft einige Forschungsvorhaben vorgestellt.

Instationäre Modellierung von PtX-Prozessketten

Das Wasserstoffleitprojekt H<sub>2</sub>Mare wurde Ende des Jahres 2025 abgeschlossen. Im Rahmen des Projekts wurde ein Konzept zur offshore Erzeugung von erneuerbaren LNG (eLNG) entwickelt. Die Prozesskette wurde verfahrenstechnisch für einen Inselbetrieb ausgelegt, d. h. die Prozesskette (siehe Bild 1.21) ist direkt an einen offshore Windpark gekoppelt ohne eine zusätzliche Verbindung zum Stromnetz. Durch die Direktanbindung ist der instationäre Betrieb der Anlagen erforderlich, da diese auf das fluktuierende Lastprofil der Windenergieanlagen reagieren müssen. Mithilfe einer instationären Modellierung konnten eine Optimierung der Anlagenkapazitäten und der Zwischenspeicher für Wasserstoff und Batterie hinsichtlich der Produktausbeute und der Kosten durchgeführt werden. Der Windpark ist mit einer Kapazität von 195 MW überbaut gegenüber der Elektrolyse mit einer Nennleistung von 100 MW. Die Methanisierung hat eine Nennleistung von 49 MW (Methanoutput, Heizwert).

In den Auswertungen der Simulationsdaten konnte gezeigt werden, dass die Größe des Wasserstoffspeichers keinen Einfluss auf die Produktausbeute hat, da die ausgewählte Methanisierungskapazität den gesamten Wasserstoff bei einer Vollastproduktion der Elektrolyse abnehmen kann. Die Größe hat jedoch einen Einfluss auf das Betriebsverhalten der Methanisierung. In Bild 1.22 ist die Anzahl des Hot-Standby der Methanisierung über die Dauer dieser aufgetragen. Mit zunehmender Wasserstoffspeichergöße nimmt die Anzahl an Hot-Standbys für kurze Dauer ab. Das heißt, durch größere Wasserstoffspeicher kann häufiges An- und Ausschalten der Methanisierung reduziert werden. Hinsichtlich der Kosten



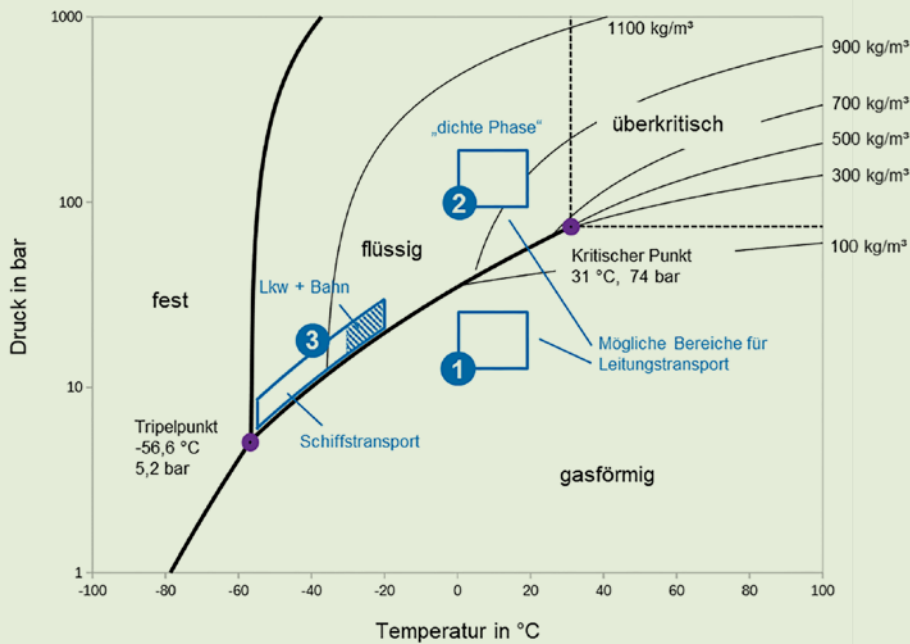


Bild 1.23: CO<sub>2</sub>-Transportoptionen im Phasendiagramm

zukünftigen Energiesystem netzdienlich, nachhaltig und volkswirtschaftlich sinnvoll integriert werden können. Dabei analysieren die drei Projektpartner Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI), DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (DBI) und die DVGW-Forschungsstelle am EBI (DVGW-EBI) aktuelle Gesetze und Regelwerke, prüfen RED III konforme Biometanpotenziale sowie Möglichkeiten, das CO<sub>2</sub> aus Biogasanlagen (BGA) aufzubereiten und zu nutzen. Anhand von Clusteringprojekten aus der Praxis sowie konkreten Netzbeispielen werden Lösungsstrategien zur Einspeisung von Biomethan und der Übergang zu einem Biomethanzielnetz erarbeitet und bewertet.

In einer Kurzstudie wurde in 2025 das Thema Sauerstoff in Biogas wieder in den Fokus genommen. Sauerstoff kann im Gasnetz oder bei O<sub>2</sub>-sensiblen Verbrauchern wie Untergrundspeichern und bei Vorhandensein anderer Gase, wie z. B. Restfeuchte, Korrosionen verursachen sowie zur Verblockung von Speichern führen. Daher gilt für den Einspeiser ein O<sub>2</sub>-Grenzwert von 1 Vol.-%. Beim Grenzübertritt oder bei angeschlossenen O<sub>2</sub>-sensiblen Untergrundspeichern ist ein Grenzwert von 10 ppm einzuhalten. Bei einem Anstieg von Biomethan im Gasnetz muss das Thema Sauerstoff im Biogas verstärkt beachtet werden, da lokal die „Verdünnung“ mit sauerstofffreiem Erdgas abnehmen kann und O<sub>2</sub>-sensible Verbraucher nicht „umfahren“ werden können. Um Kosten für eine mögliche Sauerstoffentfernung zu vermeiden, sollte der Fokus auf der Sauerstoffvermeidung im Biogasprozess liegen. In 2025 hat das Team VT dieses Thema in unterschiedliche Arbeitskreise des DVGW eingebracht und wird sich u. a. im Rahmen des Projekt BIONET auch in 2026 mit dem Thema weiter befassen.

#### Aufbau und Betrieb einer LNG-Löslichkeitsapparatur

Die LNG-Löslichkeitsapparatur dient der Gewinnung von Daten zum Löslichkeitsgleichgewicht von Gasmischungen unter tiefkalten Bedingungen. In der Apparatur ist die Temperatur in einer Messzelle (500 ml) mit flüssigem Stickstoff eingestellt. In Validierungsversuchen mit hohem Anteil an kondensiertem Methan wurde für den Druckbereich bis 5 bar (-137 °C) eine gute Übereinstimmung mit den Gleichgewichtsdaten nach Antoine erreicht. In ersten Versuchen mit einem Wasserstoff/Methan-Gasgemisch (2 % H<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub>) zeigte sich bisher kein signifikanter Einfluss von Wasserstoff auf die CH<sub>4</sub>-Gleichgewichtsdaten (Bild 1.24).

#### 1.6.3 Arbeitsgruppe „Materialprüfung“

Andreas Strauß, Sibylle Böcker, Stefan Herzog, Dominik Jäger, Judith Kupper, Sonja Lutz, Nora Meyer, Jörg Riedl, Sarah Regnery, Mario Thauer

Die nationale und internationale Nachfrage nach Prüfdienstleistungen des akkreditierten Materialprüflabors für Dichtungs- und Korrosionsschutzmaterialien sowie für Hilfsstoffe wie Dichtstoffe, Schmierstoffe, Lecksuch- und Odoriermittel ist weiterhin auf einem hohen Niveau.

Prüfungen für Energieträger der Energiewende, insbesondere Wasserstoff und DME aus erneuerbaren Quellen, sind im größeren Umfang etabliert und zwischenzeitlich zu einem wesentlichen Bestandteil des Prüfportfolios geworden.

Die Entwicklung von spezifischen Prüfmethode wird weiter fortgeführt. Die in Forschungsprojekten von den ermittelten Grundlagen und davon abgeleiteten Prüfverfahren für

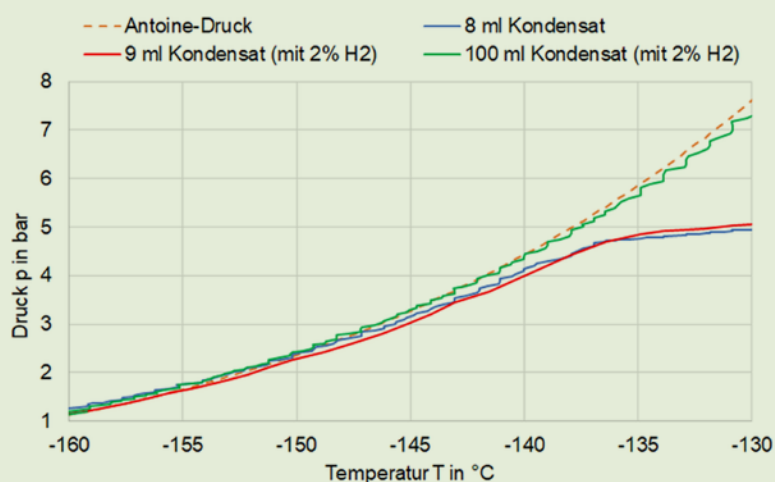


Bild 1.24: CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-Flüssig-Dampf-Gleichgewichtsdrücke

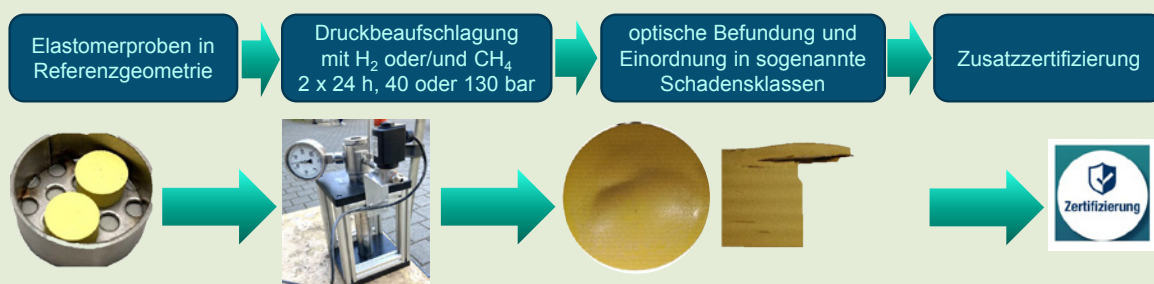


Bild 1.25: Prüfablauf für RGD-Prüfungen (rapid gas decompression) nach ZP5101, Quelle: EBI

Materialien finden bereits in diversen Zertifizierungsprogrammen (ZP) der DVGW CERT GmbH Anwendung.

Das bereits im Dezember 2021 veröffentlichte ZP 5101 wurde im Dezember 2025 hinsichtlich Prüfungen zu Rapid Gas Decompression (RGD) erweitert und veröffentlicht. Entwickelt wurde diese Prüfung im Rahmen des DVGW-Forschungsprojekts „H<sub>2</sub>&Werkstoffe (HydEKuS) - Ermittlung von wissenschaftlichen Grundlagen für Wasserstoffanwendungen von Elastomeren, Kunststoffen, Schmier- und Dichtmitteln in der Gasinfrastruktur“ und wird seither ebenfalls als Prüfdienstleistung angeboten.

Derzeit betrachten die Arbeitsgruppe im DVGW-Forschungsprojekt „Erneuerbarer Dimethylether (rDME) - rDME im Flüssiggasmarkt – Integration von erneuerbarem Dimethylether ins technische Regelwerk“ die Wechselwirkung von Elastomeren, Flachdichtungswerkstoffen, Schmierstoffen und Dichtmitteln mit DME. Das Projekt wird in 2026 abgeschlossen. Signifikante Potenziale für weitere Prüfmethoden wurden bereits identifiziert und könnten in ZPs kurzfristig Anwendung finden.

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen und Prüfungen bilden darüber hinaus eine breite Datenbasis zur Fortschreibung und Ergänzung der entsprechenden Normen auf europäischer und internationaler Ebene.

Die Erweiterung des Prüfportfolios geht einher mit dem beständigen Ausbau der Prüfeinrichtungen. Im Rahmen des Forschungsprojekts HydEKuS wurde u. a. der Einfluss von schnellen Druckwechseln auf Elastomerwerkstoffe untersucht. Aufgrund der Erkenntnis, dass es durch diese Beanspruchung zu Schäden im Werkstoff kommen kann, wurde eine geeignete Prüfgrundlage in Form der Erweiterung des Zertifizierungsprogramms ZP5101 entwickelt und schließlich im Dezember 2025 durch die DVGW CERT GmbH veröffentlicht. Diese Prüfung wird neben Wasserstoff auch mit Methan für die Druckstufen 30 bar sowie 100 bar angeboten. Der Prüfablauf ist in Bild 1.25 dargestellt.

Schadensbilder, wie sie durch RGD-Effekte verursacht werden können, sind in Bild 1.26 li.,re. zu sehen.

Es werden vermehrt Fragestellungen zur Bewertung der Eignung von Werkstoffen in Kontakt mit diversen Gasen und Medien an die Arbeitsgruppe herangetragen. Dafür wurde eine Sonderprüfkammer (Bild 1.27 li.,re.) angeschafft, die die Auslagerung von Proben in Druckbehältern über einen weiten Temperaturbereich in inertisierter Atmosphäre ermöglicht. Mit einer kontinuierlichen Sauerstoffkonzentrationsmessung in Kombination mit einer dynamischen Stickstoffinertisierung sind nicht nur Prüfungen in einem Temperaturbereich von -50 °C bis hin zu 150 °C, sondern



Bild 1.26 li.,re.: Durch RGD an HNBR-Werkstoffen generierte Schadensbilder: nach 2 x 24 h, 130 bar H<sub>2</sub> (li.), nach 2 x 24 h, 130 bar CH<sub>4</sub> (re.)



Bild 1.27 li.,re.: ATEX-konforme Prüfkammer

auch mit brennbaren Gasen unter sicheren Bedingungen möglich.

Für effiziente Prüfungen wird der Gerätepark fortlaufend erneuert. Beispielsweise wurde eine neue Ozon-Prüfkammer angeschafft, die eine langjährig genutzte Prüfkammer ersetzt (Bild 1.28). Aufgrund der stark nachgefragten Prüfung im Rahmen des Standardprüfgeschäfts befindet sich dieses nun im regelmäßigen Einsatz.

Die Vernetzung in Gremien zur Gestaltung und Fortschreibung von Normen und Regelwerken ist von essenzieller Bedeutung. In mitarbeitenden und auch leitenden Funktionen sind die Mitarbeiterinnen und 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 vertreten.

Zur H<sub>2</sub>-Normung wurden im Rahmen der im November 2025 abgeschlossenen BMWK-geförderten Normungsroadmap „Wasserstofftechnologien – Unterstützung des Markthochlaufs von Wasserstoff in Deutschland“, in der die Arbeitsgruppe in der AG Bauteile für Anwendung und Technologien agieren, Normungsprojekte priorisiert und forciert. Für die Fortschreibung der Normen DIN EN 549, DIN EN 377, DIN EN 751-1 und DIN 3535-6 konnten finanzielle Förderungen erlangt werden.



Bild 1.28: Neue Ozon-Prüfkammer



Bild 1.29: Fahrzeugunterstützte Messtechnik zur oberirdischen Überprüfung von erdverlegten Gasleitungen Quelle: DVGW-EBI

#### 1.6.4 Arbeitsgruppe „Brennstofflabor“

Jochen Schütz, Kerstin Kröger, Stephan Seidelt, Cathérine Notar, Niklas Holschuh, Heike Kropfnger

Das Team Brennstofflabor übernimmt neben der Durchführung standardisierter, genormter und akkreditierter Analyse- und Probenahmeverfahren eine zentrale Rolle in den Forschungsaktivitäten des Engler-Bunte-Instituts ein. Die Kernkompetenzen liegen insbesondere in der Probenahme und Analyse gasförmiger Brennstoffe sowie verschiedener Zwischenprodukte, Gasbegleitstoffe und prozessbedingter Verunreinigungen. Hierfür steht ein umfangreiches Spektrum modernster chromatographischer und spektroskopischer Analysengeräte sowie spezialisierter Probenahmeapparaturen und -methoden zur Verfügung.

Das Brennstofflabor beschäftigte sich 2025 weiterhin mit der Vertiefung der Expertise im Bereich der Bestimmung der Wasserstoffbeschaffenheit. Vor allem lag der Fokus auf der weiteren Verbesserung der anspruchsvollen Probenahmemethode und der Bestimmung stark adsorbierender Komponenten wie z. B. Ammoniak, Wasser und Schwefelverbindungen.

Im Bereich Methodenentwicklung arbeitete die Arbeitsgruppe Brennstofflabor ständig an der Etablierung und Weiterentwicklung von Messmethoden. Hierbei wurden die nötigen Validierungsmessungen und weitere Vorarbeiten durchgeführt, auf deren Grundlage akkreditierbare Messmethoden zur Wasserstoffanalytik erarbeitet werden.

Im Rahmen des Wasserstoff-Leitprojekts GetH2 TransHyDE (BMFTR) wurden 2025 die abschließenden Aufgaben im Projekt bearbeitet. Neben der Gasbeschaffenheitsanalytik von Gaspro-

ben wurde vor allem die adsorptive Gasreinigung (AG VT), messtechnisch unterstützt. Darüber hinaus wurde ein Verbundübergreifendes Whitepaper erarbeitet und veröffentlicht.

Innerhalb des Forschungsprojekts RingWaBe (BMV) lag in 2025 der Fokus hauptsächlich auf der Validierung der Messmethoden einzelner Analysen durch Ringversuche, sowie der Probenahme von realen bzw. realitätsnahen Wasserstoffproben. Darüber hinaus wurde ein Ringversuch zur Validierung der Behältervorbereitung für die Probenahme durchgeführt.

Im Dienstleistungssektor war das Brennstofflabor schwerpunktmäßig mit vollumfänglicher Beprobung von Biogasanlagen und den anschließenden Analysen von Biomethan tätig.

Neben der Gasbeschaffenheit, Analytik und Probenahme, beschäftigte sich die Arbeitsgruppe auch in 2025 weiterhin mit sicherheitstechnischen Aspekten bei der netzgebundenen Gasverteilung in der öffentlichen Versorgung. Im Bereich der Odorierung wurde das DVGW-Forschungsprojekt G202416 „H<sub>2</sub>-Odor II“ bearbeitet, wobei im Brennstofflabor die Eignung neuartiger, schwefelfreier Odoriermittel untersucht wurde. Hierzu wurden in mehreren Kampagnen, olfaktorische Untersuchungen zur Geruchsschwellenbestimmung und zur Bestimmung des K-Werts durchgeführt.

Im Bereich Methanemissionen wurde in 2025 das DVGW-Forschungsprojekt „FaMeGQ - Fahrzeugunterstützte Messtechnik zur oberirdischen Überprüfung von erdverlegten Gasleitungen und Quantifizierung der Methanemissionen“ bearbeitet. Innerhalb des Projekts fanden mehrere Befahrungskampagnen im Bundesgebiet statt. Dabei wurden sowohl modellhafte als auch reale Leckagen detektiert und

quantifiziert. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde auch an der Erstellung der DVGW-Merkblätter G 465-4-3 „Gerätetechnik für die Überprüfung von Gasleitungen und Gasanlagen, Teil 3: Fahrzeuggestützte Systeme zur Überprüfung von erdverlegten Gasleitungen“ und G 465-4-4 „Gerätetechnik für die Überprüfung von Gasleitungen und Gasanlagen, Teil 4: Fahrzeuggestützte Systeme zur Überprüfung von Gasleitungen mittels Konzentrations- und Windmessung der Atmosphäre“ mitgearbeitet (Bild 1.29).

### 1.6.5 Veranstaltungen

#### Gaskursus 2025

Vom 31.03.-04.04.2024 fand der Gaskursus wieder in Karlsruhe statt. 54 Personen haben an den 24 Vorträgen und an einer Exkursion zur Verdichterstation der terranets bw in Blankenloch teilgenommen. Routiniert wurde wie bisher durch das Grundwissen der Gasversorgung bis hin zu den aktuellen Fragestellungen und Innovationsthemen der Gaswirtschaft geführt und auf aktuelle Themen wie das H<sub>2</sub>-Kernnetz oder die kommunale Wärmeplanung eingegangen.

#### 66. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches 2025

Mit großzügiger Unterstützung durch Gasunie fand der 66. Erfahrungsaustausch vom 17.-19.09.2025 in Groningen statt. Die interessanten Fachbeiträge zur Rolle des Gases bei der Energiewende und aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten wurden einem Teilnehmerkreis von 62 Personen präsentiert. Im Anschluss an die Vorträge folgte eine Stadtrundfahrt per Boot durch die Grachten von Groningen und eine Stadtführung mit anschließenden Abendessen.

### 1.7 Veröffentlichungen im Jahr 2025 – EBI ceb und DVGW gt

#### Vortrag

- Bär, K.*: Biogas clustering (in Germany), IBBK – Biogas Intelligence+, Stuttgart, 10/2025
- Fedorov, A.* (2025): CO<sub>2</sub> Hydrogenation Kinetics over Fe-based Catalyst: A Study in Fixed-Bed and Slurry Reactors. Graefe, P.; Perechodjuk, A.; Wohlrab, S.; Rauch, R.; Linke, D. Annual Meeting on Reaction Engineering. Dechema. Würzburg, 27.05.2025.
- Fleck, S.* (2025): Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen: Untersuchungen zur Umsetzung kunststoffbasierter Pyrolyseöle im Flugsstromvergaser. Haas, M.; Santo, U.; Tavakkol, S.; Stapf, D.;
- Kolb, T.; Scheiff, F.*: Jahrestreffen der DECHEMA-Fachgruppen Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung (AuW), Hochtemperaturtechnik (HTT) und Rohstoffe (ROH). Dechema. Dresden, 18.03.2025.
- Haas, M.* (2025): Conversion of Suspension Fuel Droplets under Entrained Flow Gasification Conditions Investigated Using a Simplified Modeling Approach. Fleck, S.; Kolb, T.; Scheiff, F. 5<sup>th</sup> International Workshop on Oxyfuel Combustion. Aachen, 19.03.2025.
- Haas, M.* (2025): Conversion of suspension fuels under entrained flow conditions. Fleck, S.; Santo, U.; Jakobs, T.; Scheiff, F.; Kolb, T.: Deutscher Flammentag. Universität Paderborn. Paderborn, 17.09.2025.

- Mörs, F.*: Biogasanlagen Clusterung - Wann lohnt es sich?, 8. Bioökonomie-tag, Stuttgart, 02/2025
- Mörs, F.*: Einspeisung von Biomethan ins Gasnetz - Aktuelle Situation und Herausforderungen, Biomethantag, Unterer Lindehof, Eningen, 07/2025
- Mörs, F.*: Weiternutzung von LNG-Terminals für den Import von Wasserstoff und Derivaten, H<sub>2</sub>-Kolloquium Baden-Württemberg 2025, Fellbach, 07/2025
- Mörs, F.*: Vergleich der Offshore-Erzeugung von grünem Wasserstoff und Methan, Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches, Groningen, 09/2026
- Mörs, F.*: Hochlauf der CO<sub>2</sub>-Infrastruktur – vor welchen Herausforderungen stehen wir?, Herbstveranstaltung der DGMK Bezirksgruppe Oberrhein, Worms, 11/2025
- Müller, C.*: Synergies in Renewable LNG Production, 7<sup>th</sup> Methanation Workshop, Nürnberg, 12.06.2025
- Rauch, R.* (2025): Refineries4Future. Renewable Fuels from Refineries of the Future. Gasification 2025. Active Communications International. Mailand, Italien, 19.03.2025.
- Richter, J.* (2025): Primary breakup of gas-assisted liquid sheet atomizers - experiments and simulation. Roeb, J.; Zhang, F.; Stapf, D.; Stein, O.T.; Jakobs, T.; Kolb, T. 12<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flows (ICMF). Toulouse, 12.05.2025.
- Richter, J.* (2025): Sheet burner nozzle: Influence of liquid mass flow and viscosity on droplet size. Haas, M.; Jakobs, T.; Fleck, S.; Scheiff, F.; Kolb, T. Deutscher Flammentag. Universität Paderborn. Paderborn, 17.09.2025.
- Santo, U.* (2025): High-Pressure Entrained-Flow Gasification: Validated Data from Pilot-Scale Experiments for Optimisation and Scale-Up. Böning, D.; Fleck, S.; Jakobs, T.; Michelfelder, B.; Zimmerlin, B.; Scheiff, F.; Kolb, T. EUBCE Conference. Valencia, 09.06.2025.
- Santo, U.* (2025): Experimental, balancing and equilibrium data from 5 MW high-pressure entrained flow gasification for process monitoring, optimization and scale-up. Böning, D.; Jakobs, T.; Fleck, S.; Michelfelder, B.; Zimmerlin, B.; Kolb, T., Scheiff, F. Towards Sustainable Carbon Management. Institute of Energy Process Engineering and Chemical Engineering. TU Bergakademie Freiberg. Prag, 18.09.2025.
- Scheiff, F.* (2025): Catalytic three-phase methanation - basic research & process development. DECHEMA, Fachgruppentagung Mischvorgänge, Hochdruckverfahrenstechnik, Mehrphasenströmungen. Dechema und VDI. Hamburg, Deutschland, 20.03.2025.
- Scheiff, F.* (2025): The role of hydrogen and syngas for coupling energy transformation and circular economy. Kolb, T.; Bajohr, S.; Graf, F.; Fleck, S.; Santo, U.; Jakobs, T.; Haas, M.; Heneka, M.; Köppel, W. Hydrogen and Syngas. DGMK. Essen, 29.10.2025.
- Stegmaier, T.; Schwarze, J.; Mörs, F.; Graf, F.*: CO<sub>2</sub>-Management am DVGW-EBI, DVGW Forschungskonferenz Leipzig, 04/2025
- Zeller, C.*: Vom LNG-Terminal zum H<sub>2</sub>-Terminal, Lunch&Learn, online, 02/2025

#### Poster

- Schäfer, W.; Haas, M.; Fleck, S.; Jakobs, T.* (2025): Measurement Method for Monitoring Slurry Sprays. POSTER, 03.02.2025.
- Roeb, J.; Richter, J.; Jakobs, T.; Kolb, T.; Scheiff, F.; Stapf, D.; Stein, O. T.* (2025): Volume-of-Fluid LES Modeling of Primary Breakup in a Dual-Gas-Assisted Sheet Atomizer Under Pulsating Conditions. POSTER. 21<sup>st</sup> Multiphase Flow Workshop - Conference (MPF 2025). Helmholtz-Zentrum Dresden. Dresden, 10.11.2025.
- Asbahr, W.; Lamparter, R.; Graefe, P. A.; Rauch, R.* (2025): New reactor concept of sorption-enhanced Fischer-Tropsch synthesis to avoid catalyst deactivation. POSTER. 100 Years Fischer-Tropsch Process - A Central

Pillar of Future Energy Systems. Dechema. Mülheim an der Ruhr, 05.05.2025.

Weiser, M. (2025): Design principles of resistance-heated reactors for catalytically assisted processes using methanol reforming as case study. Bajohr, S.; Scheiff, F. POSTER. 15<sup>th</sup> European Congress of Chemical Engineering (ECCE). Dechema. Lissabon, Portugal, 08.09.2025.

Kansy, M.; Bajohr, S.; Scheiff, F.; Kolb, T.: Determination of Concentration and Temperature Profiles in Honeycomb Reactors for Catalytic Methanation, POSTER, Annual Meeting on Reaction Engineering; DECHEMA, Würzburg, 26.-28.05.2025

### Tagungsband

TU Bergakademie Freiberg (Hg.) (2025): Experimental, Balancing and Equilibrium Data from 5 MW High-Pressure Entrained Flow Gasification for Process Monitoring, Optimisation and Scale-Up. Santo, U.; Böning, D.; Jakobs, T.; Fleck, S.; Michelfelder, B.; Zimmerlin, B.; Scheiff, F.; Kolb, T. 13<sup>th</sup> International Freiberg Conference on Circular Carbon Technologies. Prag, 15.-19.09.

Universität Paderborn (Hg.) (2025): Umsetzung von Suspensionsbrennstoffen im Flugstromvergaser – Untersuchung der Flammenzone. Haas, M.; Fleck, S.; Santo, U.; Jakobs, T.; Scheiff, F.; Kolb, T. 32. Deutscher Flammentag. Paderborn, 15.-17.09.

### Zeitschriftenaufsatz

Arlt, S.; Köffler, T.; Wustinger, I.; Aichernig, C.; Rauch, R.; Hofbauer, H.; Weber, G. (2025): Opportunities and Challenges in Reducing the Complexity of the Fischer-Tropsch Gas Loop of Smaller-Scale Facilities for the Production of Renewable Hydrocarbons. In: *Energies* 18 (20), S. 5479. DOI: 10.3390/en18205479.

Bär, K.; Zeller, C.; Mörs, F.; Graf, F.; Stockl, A.; Lemer, A.; Rauh, S.; Bonse, D.; Bott, A.; Knebel, F.; Buck, M.; Gorre, J.: Clusterung von Biogasanlagen - Leitfaden für die Bereitstellung von Biomethan, Herausgeber: FNR, 978-3-942147-49-1, 2025

Bär, K.: Clusterung von Biogasanlagen - Ergebnisse zur technischen Umsetzung und Kosten aus Modellregionen, LAZBW, 04/2025

Becka, R.; Bajohr, S.; Kolb, T. (2025): Review on CO<sub>2</sub> Activation via Catalytic Reverse Water-Gas Shift Reaction. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Artikel cite.70013. DOI: 10.1002/cite.70013.

Dammann, Maximilian; Hüsing, Fabian; Santo, Ulrike; Böning, David; Mancini, Marco; Kolb, Thomas (2026): Characterisation of beech wood pyrolysis oil: Chemical and physical properties and decomposition kinetics. In: *Fuel* 404, S. 134897. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134897.

Haas, Manuel; Fleck, Sabine; Jakobs, Tobias; Kolb, Thomas (2025): Liquid fuel evaporation under entrained flow gasification conditions – Insights for burner development. In: *Thermal Science and Engineering Progress* 59, S. 103342. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.103342.

Held, Mathias; Holfelder, Anna; Bajohr, Siegfried; Kolb, Thomas (2025): Deactivation of Ni catalyst in three-phase CO<sub>2</sub> methanation. In: *React. Chem. Eng.* 10 (12), S. 2825–2834. DOI: 10.1039/d5re00152h.

Held, Mathias; Rieck, Anna; Bajohr, Siegfried; Kolb, Thomas (2025): Hydrogenation of dibenzyl toluene—A competing side reaction in three phase methanation. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 132, S. 166–173. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.04.171.

Heneka, M.; Malzkuhn, S.; Graf, F. (2025): Abschätzung der THG-Emissionen einer zukünftigen Wasserstofftransportinfrastruktur. In: *gwf - Gas+Energie* 166 (03), S. 48–55.

Hüttenrauch, J.; Gladien, J.; Hoffmann, M.; Knorr, C.; Pietsch, P.; Burmeister, F. et al. (2025): H<sub>2</sub>Umstell: H<sub>2</sub>-Umstellmanagement für Gasverteilnetze. In: *energie | wasser-praxis* 76 (12), S. 76–79.

Kigle, S.; Mohr, S.; Kneiske, T.; Clees, T.; Ebner, M.; Harper, R. et al. (2025): TransHyDE-Sys: An Integrated Systemic Approach for Analyzing and Supporting the Transformation of Energy Systems and Hydrogen Infrastructure Development. In: *Energy Tech* 13 (2), Artikel 2300828. DOI: 10.1002/ente.202300828.

Khayatzadeh, A.; Köppel, W.; Gehrmann, S.; Schwigon, A.; Pattima, T.; Schrader, A.; Systemans, T. (2025): Überblick zur Dekarbonisierung des Erdgassystems mit Wasserstoff; Broschüre DVGW e.V., April 2025.

Kröger, K.; Schütz, J.; Graf, F.; Weßing, W.; Große, C.; Lehmann, S. (2025): Umsetzung der EU-Methanemissions-VO im Anwendungsbereich des DVGW-Arbeitsblattes G 465-1. In: *energie | wasser-praxis* (1). DOI: gibt.

Munch, M., et al.; Grundstoffindustrie im Wandel – die industrielle Transformation in Zeiten der Energiewende; Whitepaper Infrastrukturentwicklung Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDe Systemanalyse 12/2025

Prinz, M.: Levelised Cost of Offshore Produced eLNG, Regatec, Weimar, 05/2025

Ruske, K., et al., Synthesebericht des TransHyDe-Projekts LNG2Hydrogen, Whitepaper Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDe 08/2025

Schütz J., Zajc A., van Almsick T., Hoefler U., Schick K.: „Aspekte der Gasanalytik im Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE“, Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE, 08/2025

Schwarze, J.; Mörs, F.; Graf, F. (2025): CO<sub>2</sub>-Abscheidung - Technologien für eine klimaneutrale Zukunft. In: *Aqua&Gas* (9), S. 48–51.

Schwarze, J.; Mörs, F.; Graf, F. (2025): Vom Rauchgas zur Ressource: moderne Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung im Überblick. In: *energie | wasser-praxis kompakt*, S. 16–17. Online verfügbar unter [https://wv.gw.de/dyn\\_pdf/ewp/2025/kompakt\\_CarbonManagement/16/](https://wv.gw.de/dyn_pdf/ewp/2025/kompakt_CarbonManagement/16/).

Walker, Stella; Kolb, Thomas (2025): Pressurized Gasification of Beech Wood Char in Steam and Steam–CO<sub>2</sub> Mixtures: Kinetics Considering Steam–CO<sub>2</sub> Interaction. In: *Energy & Fuels*, Artikel acs.energyfuels.5c04287. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5c04287.

Zeller, C.; Bär, K.; Mörs, F.; Graf, F.: Biogasanlagen im Verbund: Clusterung von Biogasanlagen zur Biomethaneinspeisung in Deutschland, *energie | wasser-praxis kompakt* 11/2025

Zeller, C.: Biomethan zusammen produzieren, *Land&Forst*, 39/2025

## 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

Der Institutsteil Verbrennungstechnik widmete sich 2025 in besonderem Maße der wissenschaftlich fundierten Erforschung und Weiterentwicklung von Technologien zur flexiblen Bereitstellung von Energie. Im Zentrum stehen sowohl etablierte Forschungsfelder als auch die Erschließung innovativer Themenbereiche, wodurch ein breites Spektrum an Untersuchungen ermöglicht wird. Diese umfassen unter anderem die Energiespeicherung und -umwandlung, die Mechanismen der Rußbildung, Anwendungen der Verbrennungstechnik in stationären Anlagen und Flugzeuggasturbinen sowie die grundlegende Beschreibung von Verbrennungsprozessen mittels hochentwickelter numerischer Simulationsverfahren.

Vor dem Hintergrund der globalen Transformation hin zu einer kohlenstoffneutralen Energieversorgung kommt den Forschungsaktivitäten des Institutsteils eine herausragende Bedeutung für die Energieforschung zu. Der Fokus liegt auf der Entwicklung und Bewertung alternativer Energieträger wie Metalle, Schwefel, Ammoniak sowie Wasserstoff und dessen Gemische. Parallel dazu werden kohlenstoffhaltige Prozessgase unter dem Aspekt einer möglichst emissionsarmen Nutzung untersucht, um Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit gleichermaßen zu gewährleisten.

Die Verbrennungstechnik nimmt auch künftig eine Schlüsselrolle innerhalb der Forschung und Entwicklung im Energiesektor ein. Insbesondere in den Bereichen Energiespeicherung, effiziente Energienutzung, Integration erneuerbarer Energien sowie Entwicklung alternativer Kraftstoffe ist sie von zentraler Relevanz. Die Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energiequellen erfordert dabei eine hochdynamische, präzise Steuerung von Verbrennungsprozessen sowie deren intelligente Vernetzung innerhalb komplexer Energiesysteme. Daraus ergibt sich ein erheblicher Bedarf an interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industrie und politischen Akteuren, um die technologischen und strukturellen Herausforderungen der Energiewende erfolgreich zu bewältigen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten am Institutsteil Verbrennungstechnik liegt auf der Integration alternativer und erneuerbarer Energiequellen in industrielle Produktionsprozesse unter gleichzeitiger Sicherstellung hoher Produktqualität. Dies bedingt eine signifikante Steigerung der Energieeffizienz sowie eine präzise Regelung aller beteiligten Prozessschritte. Die hierfür notwendige ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfungsketten eröffnet neue Forschungsfelder und erfordert die Entwicklung innovativer, nachhaltiger Lösungen zur Reduktion von Emissionen und zur Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit.

Die zunehmende Komplexität der Fragestellungen macht eine systemtechnische Gesamtbetrachtung erforderlich und

unterstreicht die wachsende Bedeutung interdisziplinärer Forschung, insbesondere in enger Kooperation mit den Werkstoffwissenschaften. Für die präzise Modellierung und Simulation komplexer, multiskaliger Prozesse sind sowohl experimentelle Untersuchungen als auch numerische Methoden unverzichtbar. Fortschritte in der Rechenleistung ermöglichen hierbei eine stetig verbesserte Abbildung realer Prozesse und bilden somit eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung zukunftsweisender Technologien im Energiesektor.

Aus diesen wissenschaftlichen und technologischen Anforderungen ergeben sich folgende zentrale Forschungsschwerpunkte:

- Untersuchung von Zündvorgängen, Strömungs- und Verbrennungsinstabilitäten, Spraybildung sowie der Verbrennung neuartiger flüssiger Brennstoffe und deren Wechselwirkungen mit Werkstoffen.
- Kombination von Verbrennungsprozessen mit komplementären Verfahren, insbesondere thermoelektrischen, elektrochemischen (z. B. Elektrolyse und Brennstoffzellen), solarthermischen und solarchemischen Technologien, wobei neben energetischen zunehmend auch stoffliche Aspekte der Prozesse berücksichtigt werden.

Diese Forschungsschwerpunkte leisten einen essenziellen Beitrag zur Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung, zur Minimierung von Umweltbelastungen sowie zur technologischen und wirtschaftlichen Weiterentwicklung des Energiesektors. Durch die konsequente Entwicklung innovativer Lösungsansätze wird die Transformation des Energiesystems maßgeblich beschleunigt und eine zentrale Grundlage für eine langfristig sichere und klimaverträgliche Energiezukunft geschaffen.

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 „Numerical Simulation of Reacting Multiphase Flows“, „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien“, „Messtechnik in der Thermofluidodynamik“, „Energieverfahrenstechnik“ und „Energietechnik“ können hier erwähnt werden. Neben diesen besonders hervorgehobenen Veranstaltungen waren wieder viele Studierende während ihres Studiums auch an den Forschungsaktivitäten des Institutsteils beteiligt. Als ein wichtiges Ergebnis konnten im Jahr 2025 neun Bachelor- und acht Masterarbeiten abgeschlossen werden.

## 2.2 Laufende Forschungsarbeiten im Institutsteil Verbrennungstechnik

Die gegenwärtige Forschung im Bereich der Verbrennungstechnik greift deren zentrale Rolle bei der Bewältigung aktueller und zukünftiger energiebezogener Herausforderungen auf. Insbesondere adressiert sie Fragestellungen, die im Kontext der Speicherung und Bereitstellung von Energie aus sowohl nachwachsenden als auch fossilen Rohstoffen entstehen. Von besonderer Relevanz sind hierbei innovative Ansätze zur chemischen Energiespeicherung, die es ermöglichen, Energie in unterschiedlichen Stoffsystemen – beispielsweise auf Schwefel- oder Eisenbasis – effizient zu speichern und nutzbar zu machen.

Parallel zur Entwicklung neuartiger Energiespeicher rückt auch die Untersuchung alternativer Energieträger wie Wasserstoff und Ammoniak zunehmend in den Fokus der Forschung, da diese mit spezifischen technologischen und sicherheitstechnischen Herausforderungen verbunden sind. Den vielfältigen Forschungsaktivitäten ist gemeinsam, dass sie grundlegende Zielsetzungen verfolgen, die für eine nachhaltige Energiezukunft von entscheidender Bedeutung sind. Hierzu zählen insbesondere die signifikante Reduktion von Schadstoffemissionen während der Verbrennung, die Entwicklung innovativer Verbrennungskonzepte für einen emissionsarmen Betrieb sowie die Etablierung fortschrittlicher Modellierungsansätze. Letztere ermöglichen eine präzise Vorausberechnung von Verbrennungsprozessen und -systemen und tragen somit wesentlich zu deren Optimierung bei.

Die hohe Aktualität und Relevanz dieser Forschungsfelder spiegelt sich nicht zuletzt in der intensiven Durchführung entsprechender Vorhaben wider, die sowohl im Rahmen nationaler und internationaler Verbundprojekte als auch in enger Zusammenarbeit mit industriellen Partnern realisiert werden. Die nachfolgenden Projektbeschreibungen bieten einen exemplarischen Einblick in diese dynamischen und zukunftsweisenden Forschungsaktivitäten.

Im DFG-Projekt „Reduction Behavior of Oxidized Iron Particles used as Energy Storage Material“, das im Jahr 2025 startete, wird in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Chemische Technik von Professor Dr. O. Deutschmann am Institut für Technische Chemie und Polymerchemie (ITCP) sowie der Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik – Verfahrensmaschinen (MVM-VM) unter der Leitung von Professor Dr.-Ing. H. Nirschl die Nutzung von Eisen als zentralem Energieträger eines saisonalen, kohlenstofffreien Speicherkonzepts untersucht. Hierbei dient metallisches Eisen als Energieträger, der während der Oxidation die chemisch gespeicherte Energie freisetzt. Der Einspeicherungsschritt erfolgt dabei mithilfe der thermochemischen Reduktion der entstandenen Eisenoxide mit Wasserstoff zu metallischem Eisen.

An der Professur für Verbrennungstechnik wird die Oxidation von Mikrometergroßen Eisenpartikeln in Bunsenflammen unter exakt definierten Randbedingungen untersucht und systematisch mit ihrer anschließenden Reduktion in der Wirbelschicht verknüpft. Ziel ist es, den Zusammenhang zwi-

schen Bildungsbedingungen, Partikelstruktur und Reaktivität zu verstehen, um Eisenoxide zu erzeugen, die sich schnell, vollständig und energieeffizient mit Wasserstoff reduzieren lassen. Darauf aufbauend werden über wiederholte Zyklen die Langzeitstabilität, Effizienz und Verluste analysiert, um die Einsatzfähigkeit von Eisen als zirkulierenden Energieträger zu bewerten.

Im zurückliegenden Jahr gliederten sich die Forschungsaktivitäten entsprechend in zwei Bereiche: die Reduktion im Wirbelschichtreaktor (FBR) und die Hochtemperaturoxidation in Bunsenflammen. In den 2025 durchgeführten Reduktionskampagnen im Wirbelschichtreaktor im Pilotmaßstab, der die Reduktion von Eisenoxidpulvern im Kilogrammmaßstab bei Temperaturen bis 1.000 °C und Wasserstoffanteilen bis 100 Vol.-% ermöglicht, wurden Reduktionszeiten zwischen 30 und 120 min. bei 50 Vol.-% H<sub>2</sub> in N<sub>2</sub> variiert, wobei nach 120 min. bei allen untersuchten Temperaturen Reduktionsgrade von über 90 % und bei 700 °C bis zu etwa 99,5 % erreicht wurden. Strukturentwicklung, Reduktionsgrad und Phasenzusammensetzung der Partikeln wurden mittels verschiedener ex situ Analysen charakterisiert, um den zeitlichen Zusammenhang zwischen morphologischer Transformation, Phasenänderungen und Reaktionsfortschritt zu erfassen.

Im Jahr 2025 wurde zudem eine im Maßstab reduzierte, optisch zugängliche Laborvariante des Pilotmaßstabs-Wirbelbettreaktors aufgebaut, siehe [Bild 2.1](#) (links). In einer gemeinsamen Messkampagne am DESY mit der Abteilung von Professor Dr. J.-D. Grunwaldt des ITCP wurde zeitaufgelöste *in situ* Röntgenabsorptionsspektroskopie mit begleitender Massenspektrometrie kombiniert, um während der Reduktion gleichzeitig die festen Eisenoxidphasen und die Gasphasenentwicklung zu verfolgen. Ein exemplarisches Ergebnis des Reaktionsverlaufs ist in [Bild 2.1](#) (rechts) dargestellt. Zu Beginn ist eine schnelle Oberflächenreaktion zu erkennen, bei der Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sowie zu elementarem Eisen umgesetzt wird. Das Zwischenprodukt FeO ist unter den gewählten Versuchsbedingungen thermodynamisch nicht zu erwarten. Im weiteren Verlauf bildet sich ein Reaktionsplateau aus, bevor nach moderater Zeit ein hoher Reduktionsgrad erreicht wird. Anschließend ex situ XRD-Analysen bestätigen diesen Reduktionsgrad. Zusätzlich lässt sich die Reaktion in der Gasphase durch die Bildung von Wasser nachweisen.

Im Bereich der Hochtemperaturoxidation wurden im vergangenen Jahr in selbsterhaltenden, laminaren Eisenstaub-Luft-Flammen erstmals erfolgreich räumlich aufgelöste Partikeltemperaturen mittels multispektraler Pyrometrie gemessen. Die in Abhängigkeit von Sauerstoffgehalt und Äquivalenzverhältnis bestimmten Temperaturfelder geben in Kombination mit korrespondierenden Analysen der Phasenzusammensetzung und Morphologie oxidierter Partikeln wesentliche Einblicke in die Flammenstruktur. Außerdem erlauben sie Rückschlüsse auf dominante Einflüsse der Randbedingungen der Verbrennung auf das entstehende partikuläre Oxidationsprodukt. Die Phasenzusammensetzung und Morphologie wurde in ex situ Analysen erfasst. In einem ers-

ten Schritt zur Untersuchung des zyklischen Redox-Betriebs, wurden Verbrennungsexperimente durchgeführt, bei welchen dem Wirbelschichtreduktionsreaktor entnommene Partikeln verwendet wurden. Weiterführende Untersuchungen sollen den Einfluss dieser Partikeln auf die Flammenstruktur der Eisenstaub-Luft-Flamme sowie grundlegende Erkenntnisse zur Morphologieentwicklung der Partikeln im zyklischen Betrieb liefern.

Neben der Hochtemperaturoxidation von Eisen mit molekularem Sauerstoff in Eisen-Luft-Flammen, kann die Oxidation von Eisen auch bei moderateren Temperaturen mit Wasserdampf erfolgen. Dieser Reaktionspfad ermöglicht die direkte Erzeugung von Wasserstoff bei gleichzeitiger Wärmeabfuhr ( $3 \text{ Fe} + 4 \text{ H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{ H}_2$ ). Analog zum oben beschriebenen Stoffzyklus, können die gebildeten Oxide mithilfe von Wasserstoff zu Eisen reduziert werden, wodurch die Eisen(oxid)matrix als kombinierter, indirekter (Energie-) und Wasserstoffspeicher dient.

Im Forschungsprojekt „BOY-200 – Entwicklung eines Reaktors mit hoher Zyklusstabilität für die indirekte Wasserstoffspeicherung über die Eisen-Wasserdampf-Reaktionsroute“, gefördert durch die gemeinnützige Friedrich und Elisabeth Boysen-Stiftung, wird dieser Stoffzyklus in einem Festbettreaktorsystem hinsichtlich optimaler Struktureigenschaften, Reaktionsbedingungen und Materialzusammensetzung untersucht. Die Untersuchungen knüpfen an die gewonnenen Erkenntnisse des von der Academy for Responsible Research, Teaching, and Innovation (ARRTI) des KIT geförderten Forschungsvorhabens an. Im Fokus des ersten Projektjahres stand die Untersuchung unterschiedlicher makroskopischer Eisenstrukturen, welche von Nebenprodukten der Metallverarbeitungsindustrie, wie Eisenspänen und -pellets, über Eisenwollen, -gestricken und -pulver, bis hin zu maßgeschneiderten porösen Eisenstrukturen wie Wabenkörpern oder Schäumen reichten. Die Makrostruktur der verwendeten Eisen(oxid)matrix beeinflusst die im zyklischen Betrieb entscheidenden Zielgrößen, wie Druckverlust, Wasserstoffausbeute, Reduktionsgrade und die Zyklusstabilität, maßgeblich. Zur Quantifizierung der Umwandlungsraten der Redoxreaktionen wurde eine geeignete Gasphasendiagnostik herangezogen. Die kontinuierlichen Veränderungen der Eisen(oxid)matrixstrukturen während des zyklischen Redox-Betriebs wurden mithilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Strukturoberfläche und -querschnitte erfasst. Diese erlauben eine Verknüpfung der makro- und mikrostrukturellen Veränderungen mit den experimentell bestimmten Zielgrößen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass feine Strukturen initial hohe Reaktionsraten aufweisen. Jedoch unterliegen diese Strukturen verstärkt Sinterprozessen, die zu einer Effizienzabnahme führen, wodurch sich der Reaktionsumsatz in fortgeschrittenen Redox-Zyklen auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau stabilisiert. Materialien aus Nebenprodukten der metallverarbeitenden Industrie, bieten sich als kostengünstige Lösung für die Anwendung zur indi-

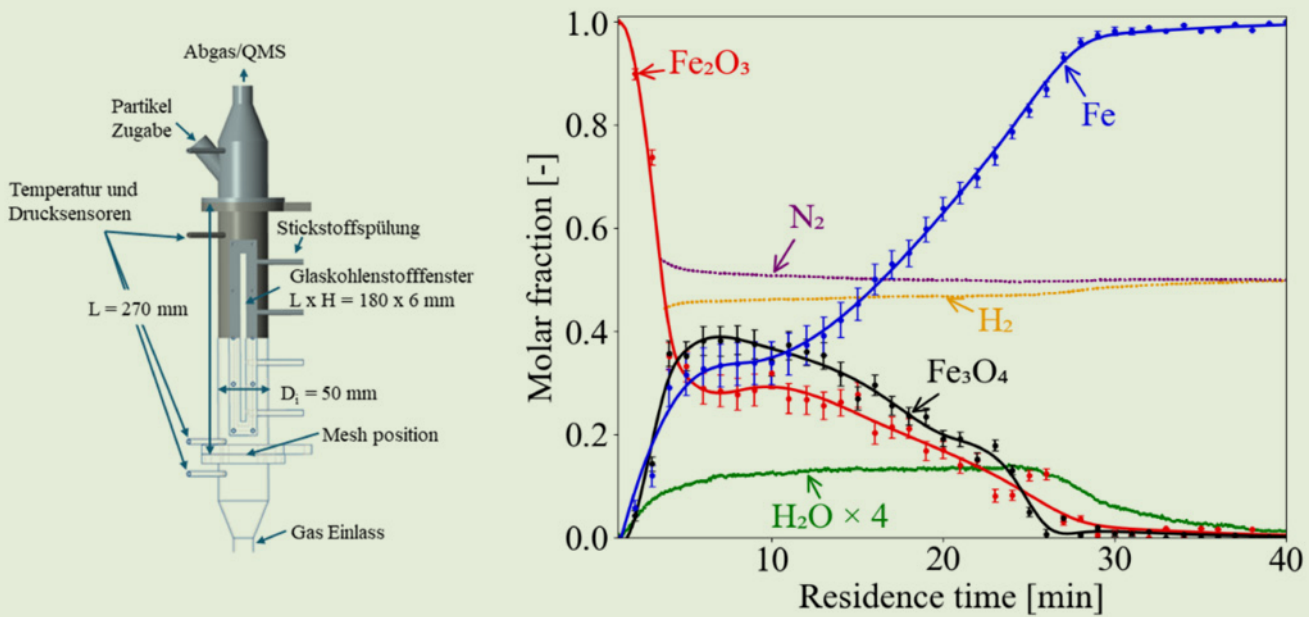
rekten H<sub>2</sub>-Speicherung an, zeigen im zyklischen Betrieb jedoch nur moderate Reaktionsumsätze. Poröse Strukturen wie Wabenkörper und Eisenschäume bieten eine ausgewogene Kombination zwischen Reaktivität und Zyklusstabilität. In **Bild 2.2** sind exemplarisch die Wasserstoffkonzentrationen und Reduktionsumsätze von Eisenschäumen über fünf Redox-Zyklen bei einer Reaktionstemperatur von 700 °C dargestellt. Die Eisenschäume wurden von der Abteilung für Zelluläre Metallische Werkstoffe und Komponenten des Fraunhofer IFAM in Dresden bereitgestellt. Nach einem leichten initialen Abfall stabilisiert sich die Wasserstoffausbeute bei fortschreitender Zyklusanzahl auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Die potenziell komplexere und teurere Herstellung individuell gefertigter, poröser Strukturen könnte also durch deren höhere Effizienz und Langlebigkeit gerechtfertigt sein.

Das im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 01IF22952N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) geförderte Forschungsvorhaben „Kondensatbildung in Abgassystemen“ wird gemeinsam mit dem Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des KIT unter der Leitung von Professor Dr. sc. techn. Thomas Koch durchgeführt. Ziel des im Jahr 2026 auslaufenden, dreijährigen Projekts ist die Untersuchung der Bildung und Zusammensetzung von Kondensaten auf abgasführenden Bauteiloberflächen während der Kaltstart- und frühen Warmlaufphase von Otto-, Diesel- und Wasserstoffmotoren. Die chemische Analyse der Kondensate und Ablagerungen sowie die optischen Untersuchungen der Kondensatbildung fällt in den Arbeitsbereich der Professur für Verbrennungstechnik.

Während des Motorkaltstarts führen niedrige Bauteiltemperaturen in Kombination mit einem hohen Feuchtegehalt des Abgases zur Unterschreitung des Taupunkts und zur Bildung von Kondensat auf den Bauteiloberflächen. Die Kondensate bestehen zu >90 Vol.-% aus Wasser und enthalten geringe Anteile organischer Komponenten, überwiegend unverbrannten Kraftstoff. Gleichzeitig sind sie stark sauer (pH 1-4), was mit der NO<sub>x</sub>-Bildung korreliert und auf nitrose und nitratbasierte Säuren zurückzuführen ist. Unter diesen Bedingungen können organische Komponenten im sauren Milieu mit Rußpartikeln zu schwerlöslichen, hochmolekularen Ablagerungen reagieren, die die Funktion von Abgassystemen beeinträchtigen.

Die Untersuchungen umfassen optische Analysen der Kondensatbildung sowie chemische Analysen der Kondensate und Ablagerungen mittels GC-MS, Ionenchromatographie, Kontaktwinkelmessungen und Karl-Fischer-Titration. Die Abgaszusammensetzung wird mit FTIR-Spektroskopie bestimmt und dient wiederum der Berechnung der Taupunkttemperatur. Ergänzend wird die Oberflächentemperatur unter realen Motorbedingungen mittels Phosphorthermometrie gemessen.

**Bild 2.3** zeigt den zeitlichen Verlauf von Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur während eines Kaltstartzyklus sowie die daraus resultierende Tropfenbildung. Die Oberflächentemperatur wird dabei berührungslos mittels Phos-



**Bild 2.1:** Schematische Darstellung des optisch zugänglichen Wirbelbettreaktors sowie zeitlicher Verlauf der Gas- und Eisenoxidphasen während der Reduktion

phorthermometrie erfasst. Gleichzeitig wird die Anzahl der Tropfen aus Kameraaufnahmen zeitaufgelöst bestimmt und mithilfe eines entwickelten Bildanalysealgorithmus analysiert. Es zeigt sich klar, dass Kondensation immer dann einsetzt, wenn die Oberflächentemperatur unter den Taupunkt fällt. In diesen Phasen steigt die Tropfenanzahl deutlich an, während sie oberhalb des Taupunkts stagniert oder wieder abnimmt.

Moderne Stromnetze erfordern flexibel regelbare Kraftwerkskapazitäten, die Schwankungen infolge des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien kompensieren können. Gasturbinenkraftwerke eignen sich hierfür in besonderem Maße, da sie rasch auf Lastwechsel reagieren und einen wesentlichen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Ihr konventioneller Betrieb mit Erdgas steht jedoch den übergeordneten Dekarbonisierungszielen entgegen. Wasserstoff stellt als kohlenstofffreier Brennstoff eine vielversprechende Alternative dar, geht jedoch mit erheblichen verbrennungstechnischen Herausforderungen einher.

Das in Jahr 2025 gestartete EU-Projekt *ACCEPT* adressiert mit einer Laufzeit von vier Jahren diese Fragestellungen in enger Kooperation mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Durch gezielte Grundlagenexperimente sollen belastbare Daten zur Flammenchemie gewonnen, numerische Modelle weiterentwickelt sowie brennstoffflexible Brennkammerkonzepte erarbeitet werden, die eine stabile Verbrennung bei gleichzeitig niedrigen  $\text{NO}_x$ -Emissionen gewährleisten. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf Untersuchungen unter erhöhtem Druck, da hier die experimentelle Datenbasis nach wie vor unzureichend ist.

Der Beitrag der Professur Verbrennungstechnik konzentriert sich auf grundlagenorientierte experimentelle Untersuchungen zur Verbrennung unter erhöhtem Druck. Einen zentralen Schwerpunkt bildet die Bestimmung chemischer Zeitskalen und Stabilitätsgrenzen für Wasserstoff- sowie Wasserstoff/Methan-Flammen. Zu diesem Zweck wurde ein bestehender Druck-Gegenstrombrenner, dargestellt in **Bild 2.4** (links), für den Betrieb mit Wasserstoff in sowohl vorgemischten als auch nicht-vorgemischten Konfigurationen umgebaut und erweitert. Ergänzend ermöglicht ein Druckreaktor die systematische Untersuchung ausgewählter Brenner- und Düsenkonfigurationen bei Betriebsdrücken von bis zu 10 bar, die dazu zur Verfügung stehenden Druckreaktoren des Institutsteils Verbrennungstechnik sind in **Bild 2.4** (rechts) dargestellt. Im Fokus steht dabei die grundlegende Analyse verschiedener Düsengeometrien sowie Staging-Konzepte hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Emissionsverhalten und Verbrennungsstabilität. Die Entwicklung der jeweiligen Konzepte erfolgt dabei in enger Abstimmung mit den Industriepartnern Ansaldo Energia SPA und MTU Aero Engines AG.

Ammoniak, das aus grünem Wasserstoff synthetisiert werden kann, bietet dank einfacher Verflüssigbarkeit, effizientem Transport und bekannter Infrastruktur ein großes Potenzial als kohlenstofffreier Energieträger. Die Verbrennung von Ammoniak ist jedoch mit drei zentralen Herausforderungen verbunden: der geringen Verbrennungsgeschwindigkeit und damit eingeschränkter Flammenstabilität, hohen  $\text{NO}_x$ -Emissionen aufgrund des Stickstoffanteils sowie der Toxizität unverbrannten Ammoniaks und den damit verbundenen Anforderungen an die Abgasreinigung. Für einen breiten technischen

Einsatz sind daher ein vertieftes Verständnis der Verbrennungsprozesse und geeignete Brennersysteme erforderlich.

Im DFG-geförderten Projekt „HyCAM“ des Schwerpunktprogramms SPP 2419 wird hierzu die nicht-vorgemischte Ammoniakverbrennung in maßgeschneiderten keramischen, porösen, inerten Medien (PIM) untersucht. Das Projekt bündelt experimentelle Arbeiten (EBI-VBT), numerische Simulationen (EBI-TFS) und additive Fertigung (TU-BAF-IKFW). Durch das poröse Medium wird Wärme aus der festen Phase zurückgeführt, die effektive Flammgeschwindigkeit steigt, und die Flammenstabilität verbessert sich deutlich. Gleichzeitig fördern Vermischung und Temperaturhomogenisierung eine weitgehende Umsetzung des Brennstoffs, sodass reine Ammoniak/Luft-Flammen über einen breiten Leistungsbe- reich stabilisiert werden können.

Die nicht-vorgemischte Betriebsweise reduziert die  $\text{NO}_x$ -Emissionen um etwa 90 % gegenüber dem vorgemischten Betrieb (z. B. 31 ppmv  $\text{NH}_3$ , 111 ppmv  $\text{NO}_x$  gegenüber 2 ppmv  $\text{NH}_3$ , 1148 ppmv  $\text{NO}_x$  bei  $P = 0,25 \text{ MW m}^{-2}$ ,  $\Phi_g = 0,8$ ). Die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen liegen dabei moderat erhöht bei etwa 30 ppmv, ohne klare Abhängigkeit von Brennerleistung oder Äquivalenzverhältnis. Volumengemittelte Simulationen (VAS) reproduzieren diese Trends und zeigen, dass in brennstoffreichen Zonen gebildeter Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) die  $\text{NO}_x$ -Reduktion unterstützt. Experimente an einer eindimensionalen Gegenstromflamme sowie invasive Gasprobenahmen im PIM bestätigen die Entmischung des entstehenden Wasserstoffs:  $\text{H}_2$  wird dabei bevorzugt auf der Oxidatorseite umgesetzt und mindert so brennstoffgebundene  $\text{NO}_x$ -Emissionen.

Zur detaillierten Untersuchung nicht-vorgemischter, laminarer Ammoniak/Luft-Flammen wurde ein am Karlsruher Institut für Technologie entwickelter, beheizter Schlitzbrenner eingesetzt (Bild 2.5). Mit Ofentemperaturen bis 1.300 K und variablen Wandabständen von 8, 10 und 16 mm lässt sich die Umgebung eines porösen Hohlrums gezielt nachbilden. Die Messungen zeigen, dass die globalen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen mit steigender Wandtemperatur und zunehmender thermischer Leistung (bzw. sinkender Verweilzeit) für alle Wandabstände systematisch abnehmen und Werte von unter 5 ppmv erreichen. Zudem lässt sich in der nicht-vorgemischten Betriebs-

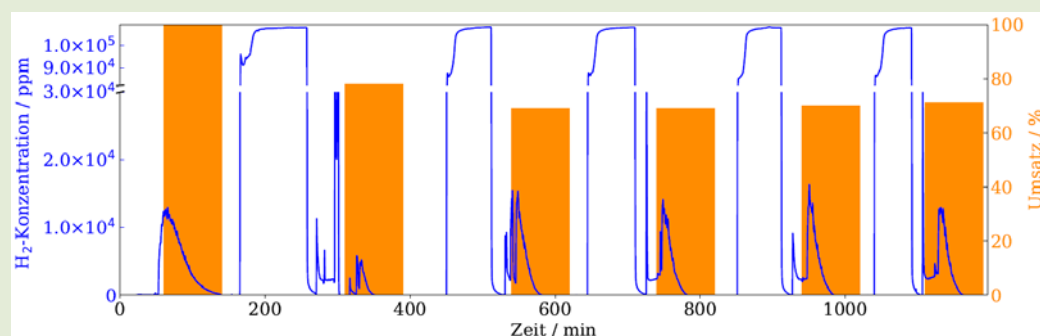
weise ein geringer  $\text{NH}_3$ -Schlupf (17 ppmv) bei gleichzeitig vergleichsweise niedrigen  $\text{NO}_x$ -Emissionen (137 ppmv) realisieren.

Bild 2.6 zeigt räumlich aufgelöste Chemilumineszenzspektren der angeregten Spezies  $\text{OH}^*$ ,  $\text{NH}^*$  und  $\text{NH}_2^*$  bei  $T = 1073 \text{ K}$ ,  $P = 0,6 \text{ kW}$  und einem Wandabstand von 10 mm sowie die zugehörigen Intensitätsprofile im Vergleich zu zweidimensionalen Simulationen mit einem Mechanismus nach Konnov. Messung und Simulation stimmen hinsichtlich Form, Lage der Emissionszonen und relativer Intensität sehr gut überein; der Einfluss von Wandtemperatur und thermischer Last wird zuverlässig erfasst. Mit steigender Temperatur und Leistung nehmen normierte Intensität und Konzentration der betrachteten Spezies zu, gleichzeitig verschiebt sich das Gebiet maximaler Intensität stromabwärts. Diese Beobachtungen sind charakteristisch für diffusionskontrollierte, nicht-vorgemischte Verbrennungsprozesse.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der entwickelte Schlitzbrenner eine geeignete Plattform für systematische Untersuchungen zur Ammoniakverbrennung darstellt und die zentrale Rolle von Transport- und Mischungsprozessen bei der Ammoniakverbrennung verdeutlicht. Die gewonnenen Daten bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung künftiger emissionsarmer Verbrennungssysteme.

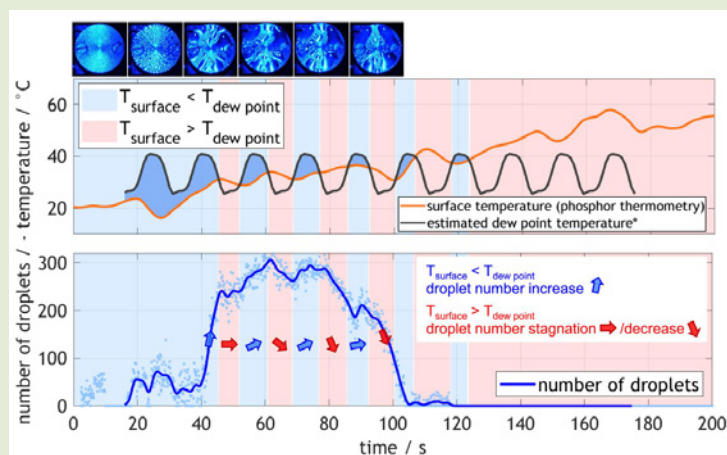
Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes FFLECS (*Novel Fuel-Flexible Ultra-Low Emissions Combustion systems for Sustainable aviation*) wurde ein brennstoffflexibler Brenner für Flugzeugtriebwerke entwickelt, der mit bis zu 100 %  $\text{H}_2$  und JET-A1 / SAF betrieben werden kann.

Durch die abgehoben brennenden Flammen wird ein hoher Grad an Vormischung und damit verbundene niedrige Schadstoffemissionen erreicht. Es wurden mehrere Konfigurationen mit unterschiedlicher Anzahl an  $\text{H}_2$ -Querstrahleindüsungen untersucht. Bei niedriger Anzahl an aktiven  $\text{H}_2$ -Querstrahleindüsungen wird eine niedrigere Abhebehöhe (siehe Konfiguration 1 in Bild 2.7) und ein größerer Stabilitätsbereich erreicht. Konfiguration 2 mit mehr aktiven  $\text{H}_2$  Querstrahleindüsungen weist im Vergleich zu Konfiguration 1 eine größere Abhebehöhe auf und es werden sehr geringe Stick-



**Bild 2.2:** Wasserstoffkonzentration und Gesamtumsatz der Reduktion des porösen Eisenschaums über fünf Redox-Zyklen bei einer Reaktionstemperatur von 700 °C

**Bild 2.3:** Zeitlicher Verlauf von Oberflächentemperatur (bestimmt mittels Phosphorthermetrie) und Taupunkttemperatur (oben) sowie der Tropfenanzahl (unten), ausgewertet aus Kameraaufnahmen mithilfe eines entwickelten Bildanalysealgorithmus, während eines Kaltstartzyklus



oxidemissionen mit  $\text{NO}_x < 10 \text{ ppm}_{15\% \text{ O}_2}$  von 0 bis 100%  $\text{H}_2$  für die in **Bild 2.7** genannten Bedingungen erreicht.

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 2025 wurden am Institutsteil Verbrennungstechnik zwei Dissertationen abgeschlossen. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die Arbeiten im Rahmen dieser Dissertationen:

**Tien Duc Luu:** Modelling and Simulation of Solid Fuel Particle Conversion (Prof. Dr. O. T. Stein, Prof. Dr. G. Wehinger)

Der Klimawandel stellt nach wie vor eine der größten Herausforderungen für die Umwelt dar, die hauptsächlich auf den von Menschen verursachten Ausstoß von Treibhausgasemissionen zurückzuführen ist. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe, insbesondere Kohle, ist eine der Hauptquellen für den Ausstoß dieser Emissionen. Trotz der negativen Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit wird Kohle in großem Umfang zur Deckung des wachsenden Energiebedarfs, vor allem in Entwicklungsländern, eingesetzt. Die gängigsten Ansätze zur Verringerung der Treibhausgasemissionen sind die Verbesserung des Kohleverbrennungsprozesses und der Einsatz von alternativen festen Brennstoffen.

Alternative feste Brennstoffe wie Biomasse und Eisen sind vielversprechende Optionen, da diese kohlenstoffarm/kohlenstofffrei verbrennen und in die bestehende Infrastruktur von Kohlekraftwerken integriert werden können. Dennoch ist ein detailliertes Verständnis des Verbrennungsprozesses von festen Brennstoffen unabdingbar für Optimierungsansätze. In diesem Zusammenhang spielen numerische Werkzeuge wie die numerische Strömungsmechanik (CFD) eine wichtige

Rolle, da sie wertvolle Erkenntnisse zur Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit von Verbrennungssystemen liefern können. In der CFD werden reaktive turbulente Gas-Feststoff-Mehrphasensysteme in der Regel mit dem Euler-Lagrange-Ansatz (EL) modelliert. Dieser bietet einen guten Kompromiss aus Berechnungseffizienz und Berechnungsgenauigkeit. In diesem Ansatz wird die Gasphase typischerweise als Kontinuum betrachtet, während die Feststoffpartikel als diskrete Lagrange-Punktpartikel angenommen und somit ihre Grenzschichten explizit modelliert werden.

Ziel der Dissertation war die Neubewertung des EL-Ansatzes für verschiedene Feststoffpartikel. Die Studie begann mit der Bewertung des Anwendungsbereiches des EL-Ansatzes für die thermische Umsetzung von Biomasse durch den Vergleich mit aufwändigeren, aber genaueren grenzschichtaufgelösten Simulationen für ein Einzelpartikel (**Bild 2.8**).

Diese Bewertung diente dazu, den Gültigkeitsbereich des EL-Ansatzes zu identifizieren und empfahl die Anwendung von Coarse-Graining-Strategien für Szenarien, die außerhalb dieses Bereichs lagen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein komplexerer Fall aufgesetzt, mit dessen Hilfe die Wechselwirkungen zwischen Turbulenz, Chemie und Feststoffpartikeln anhand der Kohleverbrennung untersucht wurde (**Bild 2.9**, links). Hierbei wurde ein mehrphasiger Tabellierungsansatz verwendet, der mit einer Large-Eddy-Simulation gekoppelt war. Die Simulationsergebnisse stimmten gut mit den experimentellen Messungen überein, was die Gültigkeit des Ansatzes bestätigte (**Bild 2.9**, rechts).

Im letzten Teil der Dissertation wurde der EL-Ansatz auf Eisenpartikel erweitert. Dabei wurde die erstmalige Untersuchung der Zündung und Verbrennung von Eisenpartikelwolken in schergetriebener Turbulenz vorgestellt. Diese Simulationen wurden mithilfe der direkten numerischen Simulation der Trägerphase durchgeführt und lieferten erste Einblicke in das Zusammenspiel zwischen Turbulenz und Zünd- und Verbrennungsverhalten sowohl monodisperser als auch polydisperser Eisenpartikelwolken (**Bild 2.10**).

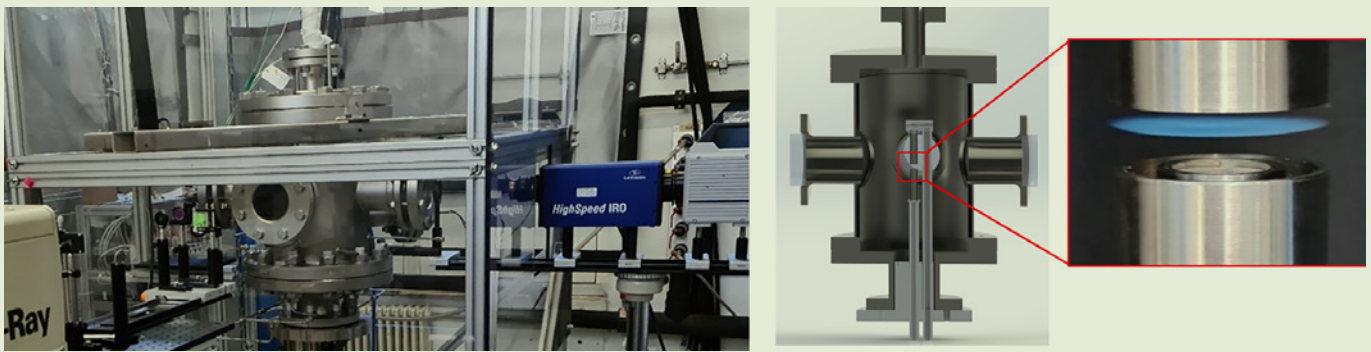


Bild 2.4: Foto des Druck-Gegenstrombrenners (links), Aufbau mit Beispielflamme (rechts)

Die Dissertation untersuchte numerische Methoden zur Simulation verschiedener pulverförmiger Festbrennstoffe, generierte Erkenntnisse, die die Optimierung von Verbrennungssystemen unterstützen und treibt damit eine saubere, effizientere und nachhaltigere Energienutzung voran.

**Alexander Schwagerus:** Experimentelle und theoretische Untersuchung der Stabilität von turbulenten vorgemischten Strahlflammen (Prof. Dr.-Ing. Nikolaos Zarzalis, Prof. Dr.-Ing. Dieter Stapf)

Die vorliegende Arbeit untersucht, wie geometrische und thermodynamische Parameter die Stabilität von Matrixbrenner-Flammen beeinflussen, um die mageren Abblasegrenzen für flexible Gasturbinentechnologien zu bestimmen. Dazu werden experimentelle Messungen, CFD-Simulationen und analytische Korrelationen kombiniert.

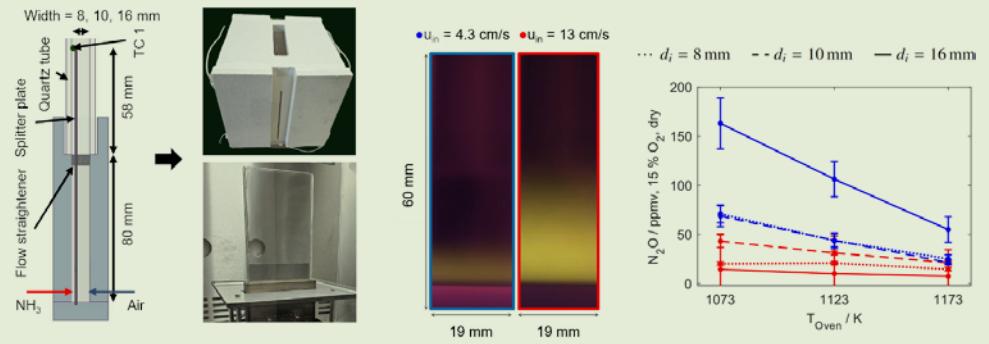
Fossile Brennstoffe stellen nach wie vor eine Schlüsseltechnologie der Energietechnik dar, verursachen jedoch durch die Emission von Treibhausgasen einen verstärkten Treibhauseffekt und verstärken damit unerwünschten Klimawandel. Der Ausbau von erneuerbaren Energiequellen, insbesondere Wind- und Solarenergie, reduziert diese Emissionen, ist jedoch durch ihre intermittierende Erzeugung gekennzeichnet und deckt nicht immer den momentanen Energiebedarf. Zur Überbrückung dieser Defizite werden Gasturbinenkraftwerke eingesetzt, weil sie dank kurzer Anlaufzeiten schnell auf Lastschwankungen reagieren können und von der EU-Kommission als essenzielle Brückentechnologie klassifiziert werden, auch für die zukünftige Wasserstoffverbrennung. Traditionelle drallstabilisierte Flammen neigen im mageren Betrieb zu Druckschwankungen, die zum Flammenabblasen und zur Beschädigung nachgeschalteter Turbinen führen. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden daher im EU-Projekt TurboReflex unverdrallte Strahlflammen untersucht, die jedoch komplexe Wechselwirkungen zwischen benachbarten Flammen aufweisen, die bislang kaum vorher-

sagbar sind. Ziel ist daher, die Grundlagenforschung zum Flammenverhalten im Matrixbrenner voranzutreiben, indem die Flammendynamik und das Strömungsfeld mittels numerischer CFD-Berechnungen und gezielter Experimente analysiert werden. Dabei werden die Einflüsse grundlegender thermodynamischer sowie geometrischer Parameter auf die mageren Abblasegrenze ermittelt, indem verschiedene Düsengeometrien verglichen werden. Dazu wurde ein validiertes CFD-Modell entwickelt, das die Berechnung der mageren Abblasegrenzen ermöglicht, und zudem aus den Ergebnissen analytische Korrelationen abgeleitet, die die Abblasegrenzen in Abhängigkeit der wichtigsten Einflussgrößen beschreiben.

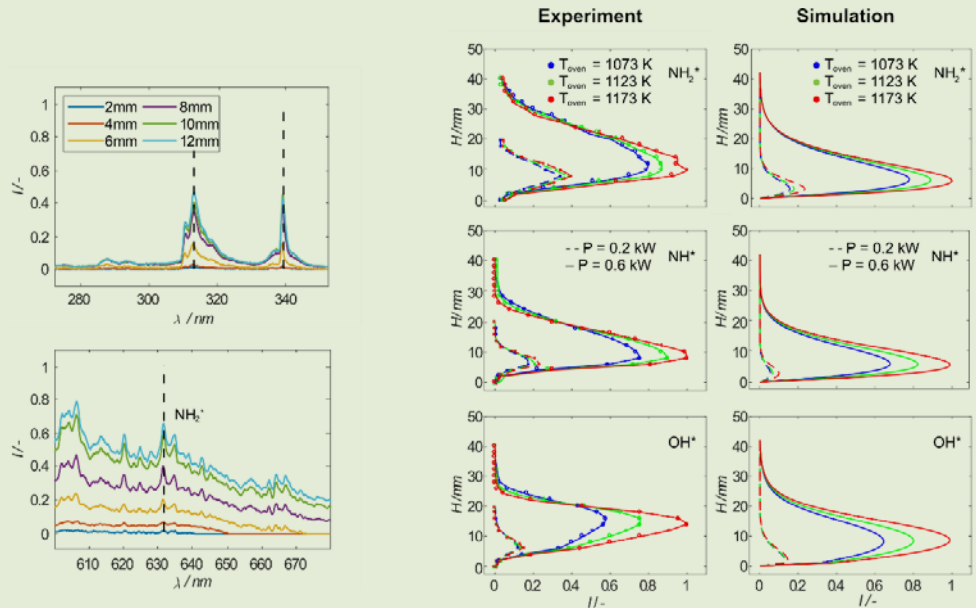
Zur Bestimmung des Einflusses fundamentaler Düsenparameter – Bohrungsdurchmesser und Versperrungsverhältnis – wurden sowohl experimentelle Laser-Doppler-Anemometrie als auch numerische Strömungs- und Verbrennungsberechnungen durchgeführt. Die numerische Simulation beruht auf dem Grobstruktur-Ansatz, der an das Flame-Generated-Manifold (FGM) Reaktionsmodell gekoppelt wurde und dabei zwei unterschiedliche Turbulenz-Chemie-Interaktionsmodelle (TCI) verwendet: das wahrscheinlichkeitsdichtebasierte JPDF-Modell sowie das turbulente Flammengeschwindigkeits-Modell (TFC). Beide TCI-Modelle reproduzierten die Veränderung der Flammenform mit steigender Luftzahl bzw. zunehmendem Volumenstrom, obwohl signifikante Unterschiede in der berechneten Flammendicke bestanden. Die räumliche Verteilung der Reaktionszonen verlagerte sich von einer zentrischen Konzentration bei Einzelflammen zu einer wandnahen Ausbreitung bei Kegelflammen, was erhebliche Auswirkungen auf die Brennkammerauslegung hat (Bild 2.11).

Die Untersuchung der mageren Verlöschgrenze (LBO) ergab, dass ein Gleichgewicht zwischen mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und laminarer Flammengeschwindigkeit erforderlich ist. Ein größerer Bohrungsdurchmesser erweitert den Stabilitätsbereich, weil er das turbulente Längenmaß und die turbulente Flammengeschwindigkeit erhöht. Das

**Bild 2.5:** Schlitzbrenner mit Ofenumgebung sowie Darstellung des vergrößerten Querschnitts (links), beispielhafte Aufnahmen von Ammoniak-Luft-Flammen bei 1073 K (Mitte) sowie N<sub>2</sub>O-Emissionen am Brenneraustritt in Abhängigkeit von Wandtemperatur, Einströmgeschwindigkeit und Wandabstand (rechts)



**Bild 2.6:** Räumlich aufgelöste, normierte Chemilumineszenzspektren von OH\*, NH\* und NH<sub>2</sub>\* (links) bei T = 1073 K, P = 0,6 kW und d = 10 mm sowie Vergleich von gemessenen und simulierten Intensitätsprofilen (rechts) für verschiedene Ofentemperaturen und thermische Leistungen.



JPDF-Modell liefert ein plötzliches globales Flammenverlöschens bei kritischer Düsenaustrittsgeschwindigkeit, während das TFC-Modell ein stufenweises Herausragen der Flammenwurzel beschreibt. Beide Modelle ermöglichen eine exakte Bestimmung des LBO-Punktes mittels des Maximums der zeitlich gemittelten Reaktionsrate. Die experimentell bestimmten LBO-Werte stimmen mit den Simulationen (Durchschnittsabweichung 10-15 %) für ein Versperrungsverhältnis von DR = 2,8 gut überein; für höhere DR liefert das JPDF-Modell die bessere Vorhersage. Aufbauend auf diesen Daten wurde eine Peclet-Korrelation entwickelt, die Bohrungsdurchmesser und volumetrische Brennkammergeschwindigkeit als charakteristische Variablen nutzt und die LBO-Grenzen für unterschiedliche Düsenkonfigurationen beschreibt (Bild 2.12).

Die Arbeit erweitert das Verständnis von Flammenphänomenen im Matrixbrenner und liefert sowohl analytische als auch numerische Werkzeuge zur LBO-Vorhersage. Zukünftige Forschung sollte den Kern- und Übergangsbereich des turbulenten Freistrahls intensiver untersuchen, optische Messverfahren für präzisere Daten einsetzen und experimentelle

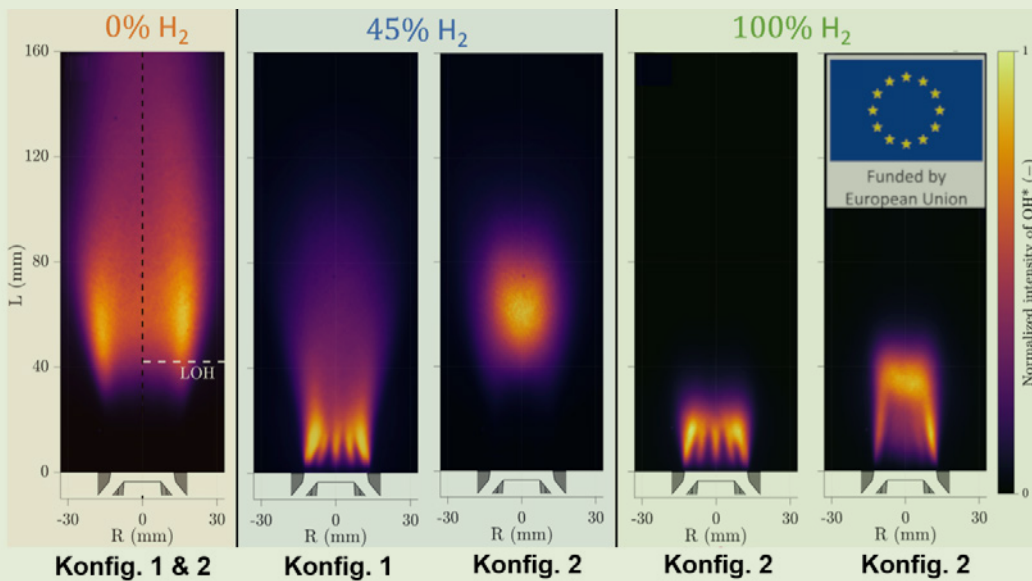
Validierungen des numerisch bestimmten Flammenumschlags durchführen. Darüber hinaus wäre die Extension der Peclet-Korrelation auf Hochdruck- und Wasserstoffverbrennung von großer Bedeutung für die klimaneutrale Energieversorgung.

### 2.4 Forschungsstelle für Brandschutztechnik

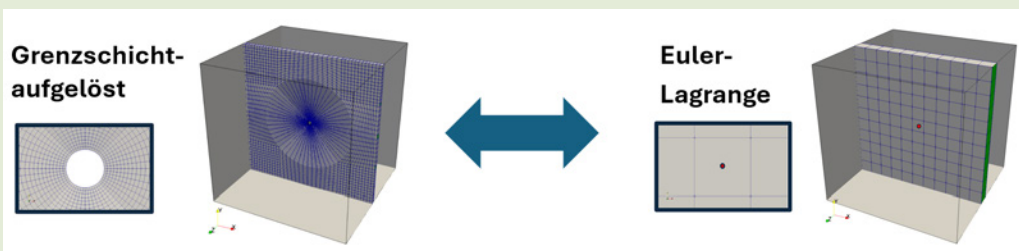
Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik ist von den Ländern beauftragt, anwendernahe Forschung für die Feuerwehren durchzuführen.

#### IMK-Forschungsprojekt „Ertüchtigung eines kommerziellen Strömungssimulationsprogrammes zum praktikablen Gebrauch bei realen Brandszenarien Teil II“ (Abgeschlossen 2025)

Im zweiten Teil des Berichts wurde die im Teil I erstellte Referenzkombination für die dreidimensionale numerische Berechnung von realen, instationären Brandszenarien eingesetzt. Bei der Übertragung auf Brandszenarien wird zwischen brandlastkontrollierten und ventilationskontrollierten Brandereignissen unterschieden. Für die Untersuchung der Modellierung von



**Bild 2.7:** OH\*-Chemilumineszenz der H<sub>2</sub>/JET-A1 Flammen bei variiertem H<sub>2</sub>-Leistungsanteil und Anzahl der aktiven H<sub>2</sub>-Querstrahleindüsen (12 bei Konfig. 1 und 32 bei Konfig. 2), Luftenlasstemperatur 673 K, Leistung 31 kW,  $\Delta_p/P = 3\%$



**Bild 2.8:** Ausschnitt des dreidimensionalen Rechengebietes für ein Einzelpartikel. Links: Grenzschichtaufgelöst. Rechts: Euler-Lagrange

Brandszenarien wird ein skaliertes Schiffscontainer mit den Abmaßen Länge x Breite x Höhe = 1 m x 1 m x 0.75 m verwendet, der in **Bild 2.13** zu sehen ist. In einer Ecke der Decke dieses Containers befindet sich eine Öffnung, durch die sowohl Abgas ausströmt als auch Frischluft nachfließt. In der Mitte des Containers befindet sich ein Brenner mit einer Fläche von Länge x Breite = 0.2 m x 0.2 m. Experimente von He et al. haben gezeigt, dass bei dieser Konfiguration in Abhängigkeit von der Größe der Öffnung und der Brandleistung sowohl brandlastgesteuerte als auch ventilationsgesteuerte Brände ablaufen können. Während sich bei geringen thermischen Leistungen ein stationärer Brand ausbildet, verlöscht der Brand ventilationskontrolliert bei gleicher Öffnungsgröße und größerer Brandleistung. Somit kann dieselbe Geometrie genutzt werden, um für beide Fälle Modelle zu entwickeln, die den Anforderungen der Brandschutzforschung entsprechen, insbesondere auf grobe Gitter anwendbar sind und wenig Rechenaufwand erfordern.

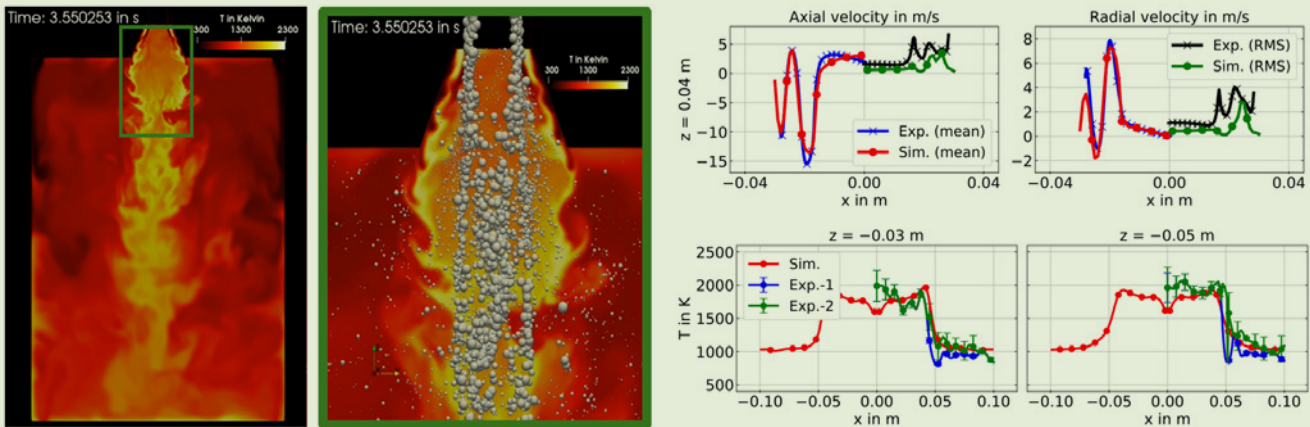
Ein brandlastkontrollierter Brand wird mit einer nach NFPA-Standard entwickelten Brandleistungskurve simuliert. Die Auswertung der Ergebnisse (s. **Bild 2.14**) zeigt, dass die

Berücksichtigung der Brandausbreitung in der Brandentstehungsphase einen leichten Einfluss hat, den Brandverlauf jedoch nicht signifikant verändert.

Zur Untersuchung ventilationskontrollierter Brände wurden zwei Modelle entwickelt und implementiert. Ein Vergleich mit experimentellen Daten im **Bild 2.15** zeigt, dass die Verlöschung abgebildet wird, wobei allerdings geringe Unterschiede im zeitlichen Verlauf bestehen.

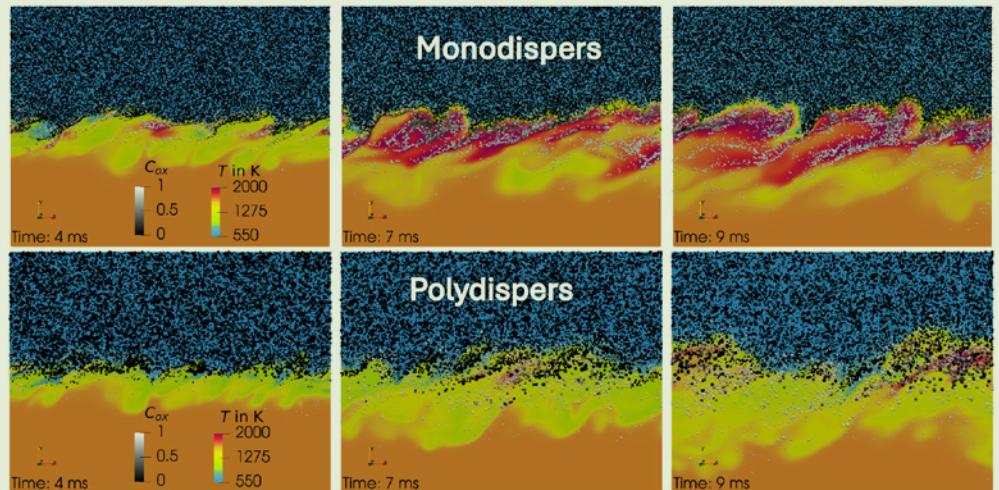
Im Abschluss wurden stochastische Effekte wie das Flammenflackern und das Flammenablösen einer frei-brennenden Gasflamme numerisch untersucht. Um wichtige Brandeigenschaften wie die Flammenlänge mit und ohne Ablösungen zu vergleichen, wurde eine neuartige, bildgebende Methode für die Auswertung von Foto- und Videoaufnahmen experimenteller Ergebnisse entwickelt und eingesetzt. Mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (s. **Bild 2.16**) von Flammenlängen wurden die Ergebnisse dieser Auswertung mit den Ergebnissen der instationären Simulation verglichen.

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Analysen zeigen, dass CFD-Modelle eine realitätsnahe Abbildung von Temperaturfeldern, Strömungsstrukturen und Rauchsichten



**Bild 2.9:** Links: Qualitative Darstellung der instantanen Gasphasentemperatur mit vergrößertem Ausschnitt des Brennerkopfs und zusätzlicher Partikeldarstellung (vergrößert). Oben-rechts: Vergleich der axialen und radialen Gasgeschwindigkeit zwischen Experiment (Exp.) und Simulation (Sim.). Unten-rechts: Vergleich der Gasphasentemperatur zwischen Exp. und Sim

**Bild 2.10:** Zeitliche Entwicklung der Gasphasentemperatur (T) sowie der Eisenpartikel, dargestellt nach Oxidationsfortschritt (Cox). Oben: Monodisperse Partikelverteilung. Unten: Polydisperse Partikelverteilung



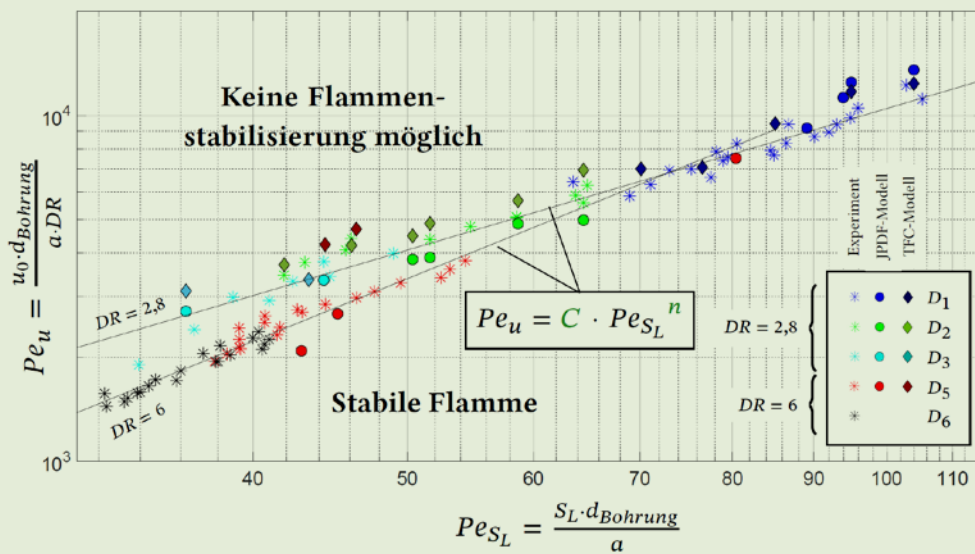
ermöglichen und somit ein wertvolles Instrument in der brandschutztechnischen Planung darstellen. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt stark von der Genauigkeit der Eingangsparameter, der Netzauflösung sowie der Modellannahmen ab. Besonders Unsicherheiten in der Materialcharakterisierung und bei der Randbedingungsdefinition können zu signifikanten Abweichungen führen.

**HTSmart - Hochtemperaturverhalten von Smart-Metern**

Im Smart-Meter-Bereich werden Gaszähler mit Batterien eingesetzt. Gemäß der EN 1359:2017 und der EN 14236:2019 können Zähler auf Hochtemperaturbeständigkeit optional bei 650 °C geprüft werden. In Deutschland ist diese Prüfung durch die TRGI verpflichtend. Dennoch gibt es aktuell keine bekannten Untersuchungen, die das Verhalten von Batterien bei solchen Temperaturen über 30 min behandeln. Es besteht die Gefahr, dass bei hohen Temperaturen Explosionen der

Batterien verursacht werden, infolge derer am Gaszähler unzulässig hohe Gasaustritte auftreten können. In dieser Hinsicht wurde ein indirekte und zum Teil direkte (bedingt durch die Schwankungen der Flamme) Beflammung mit Hilfe von einen Kiesbettbrenner für die Untersuchungen verwendet. Dieser hatte eine thermische Leistung von 320 kW und eine daraus resultierende Flammenlänge von ca. 2.2 m. Mit dieser Versuchsanordnung wird ein Brand im Raum (Wohnungsbrand) simuliert, z. B. in einen Keller, wo der Gaszähler installiert ist. Ziel ist es das Verhalten von Geräten oder Gegenstände im Brandfall zu untersuchen.

Wie in Bild 2.17 zu erkennen ist, wird der Balgengaszähler in einen Abstand von ca. 300 mm von der Brandquelle auf eine nichtbrennbare Oberfläche installiert. Die Höhe über dem Brenner betrug 300 mm. Der Abstand kann angepasst werden um eine Oberflächentemperatur von 650 °C an der Oberfläche des Balgengaszähler zu gewährleisten. Oberhalb



**Bild 2.11:** Vergleich der numerisch berechneten mit den experimentell bestimmten Abblasepunkten

des Kiesbettbrenners wurde ein Gitter mit seitlicher Höhenbegrenzung als eine Auffangwanne installiert. Diese soll gewährleisten, dass die Batterie, falls sie vom Gaszähler runterfällt, weiterhin durch die Flamme aufgeheizt wird.

Der Smart-Meter wurde eine bestimmte Zeit erwärmt, wobei der Abstand und die Beflammungszeit so eingestellt wurden, dass die im Balgengaszähler installierte Lithium-Thionylchlorid-Batterie zum thermischen Durchgehen gebracht wurden.

Lithium-Thionylchlorid-Batterien sind nicht-wiederaufladbare Energiespeicher, also Primärbatterien. Die haben eine hohe Energiedichte und eine hohe Lebensdauer, weshalb sie oftmals in Mess- und Kommunikationsgeräten, wie z. B. in der Haustechnik eingesetzt werden. In dem Gaszähler war eine LiSOCl<sub>2</sub> der Größe 34615 (d= 34 mm, l= 61.5 mm) mit einem Gewicht von 100 g und einer Kapazität von 19 Ah, also einem Energieinhalt von 70 Wh installiert.

Etwa 2 min nach Start der Beflammung ist das Frontpanel der Gaszähler geschmolzen und in die Wanne gefallen, eine Minute später ist die Batterie auch in die Auffangwanne gefallen. Nach weniger als 6 min wurde eine starke Explosion beobachtet, die mit dem thermischen Durchgehen der Batterie verbunden war. **Bild 2.18** stellt die wichtigsten Ereignisse während der Beflammung dar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei einer Beflammung sowie beim unsachgemäßen Aufladen die Lithium-Thionylchlorid-Batterien explodieren. Bei der Explosion, verbunden mit starker Rauchentwicklung, wird brennendes Lithium herausgeschleudert. Inwiefern die (schwefel- und chlorhaltigen) Abgase gefährlich sind, ist zum heutigen Standpunkt noch nicht klar. Ebenso ist die Reaktionskinetik der Explosion noch nicht bekannt.

### 2.5 DVGW-Forschungsstelle – Abteilung Gasanwendung

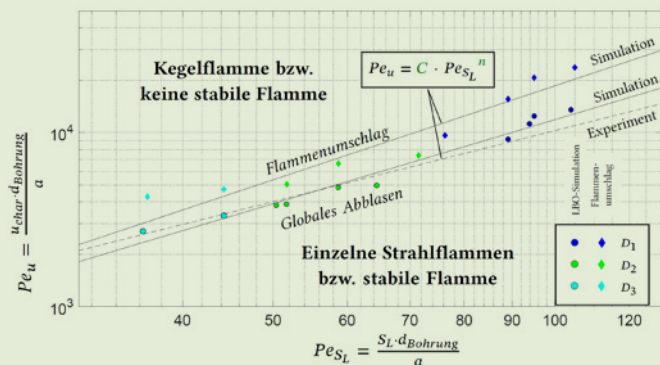
Die Abteilung unter der Leitung von Dr. Jens Hoffmann teilt sich in vier Fachbereiche auf. Diese sind die Abteilungen Verbrennungstechnik, Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen (ETEC), Armaturen und Forschung Gasanwendung. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Prüfung von Gasgeräten und Bauteilen in der Gasversorgung und Komponenten für Gasgeräte. Der Bereich Forschung gewinnt durch die Energiewende zunehmend an Gewicht und bestreicht auch die Prüfbereiche. Nachfolgend findet sich ein Rückblick auf 2025 aus Sicht der Prüfung und Forschung.

#### Abteilung Gasanwendung - Allgemein

Das Jahr 2025 stand ganz im Zeichen der Energiewende und der damit verbundenen Unsicherheiten und Herausforderungen für die Hersteller, die viele neue Projekte zurückgestellt haben. Durch den Einsatz aller Mitarbeitenden ist es gelungen die Auftragslage stabil zu halten. Hilfreich hierzu war unser regelmäßiger Kontakt zu den Herstellern vor allem durch die Besuche vor Ort durch unsere Überwachungs- und Gremientätigkeiten.

Das Frühjahr war durch die Wiederholungsbegutachtung der DAkKS geprägt. Die fünf Audittage, in denen vier Begutachter mit unterschiedlichen Schwerpunkten uns auditierten, konnten erfolgreich gemeistert werden. Die wenigen festgestellten Nebenabweichungen konnten zeitnah geschlossen werden. Die Begutachter bestätigten, dass wir mit unseren engagierten Mitarbeitern den hohen Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 gerecht werden und eine kontinuierliche Weiterentwicklung gegeben ist.

Nach langjähriger Tätigkeit sind im Bereich ETEC drei verdiente Mitarbeiter zur Jahresmitte in den Ruhestand eingetreten. Wir danken Herr Endisch (33 Jahre), Herr Geiger (21 Jahre)



**Bild 2.12:** Korrelation der Flammenumschlagpunkte und der globalen Abblasegrenzen mithilfe des Peclet-Kriteriums, aufgetragen in einem Peclet-Diagramm



**Bild 2.13:** Simulationsgeometrie für die brandlast- und ventilationskontrollierten Brandereignisse

und Herr Steil (13 Jahre) für ihr Engagement und wünschen ihnen für die neue Lebensphase alles erdenklich Gute.

Bzgl. Prüfungen der OMS-Schnittstelle von wM-Bus-Messsystemen wurden aus der "OMS-Group". (<https://oms-group.org/>) mit „ 2023-12 (Gen. 5) „ für OMS-fähige Geräte, siehe auch <https://oms-group.org/open-metering-system/oms-spezifikation>, die Prüfungsgrundlagen weiterentwickelt.

Im Bereich der Armaturen und Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen wurden die Prüftätigkeiten trotz stark veränderter Umstellungen in der Industrie mit abnehmendem Potenzial kontinuierlich aufrecht gehalten. Es bleibt festzuhalten, dass durch gutes Teamwork die Herausforderungen der Energiewende und der Neuaufstellung im Bereich gut bewerkstelligt werden konnten.

Wir blicken gespannt weiterhin voraus in das Jahr 2026, welches durch die neue Struktur des Engler-Bunte-Instituts neue Aufgaben und Chancen liefert, mit denen das Prüflaboratorium Gas die Herausforderungen der Zukunft bewältigen wird. Es wird im Prüflaboratorium Gas weiterhin möglich sein, Prüfungen aller Komponenten und Materialien sowie Sicherheitseinrichtungen der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischer Phänomene durchzuführen. Die Kompetenzen im Prüflaboratorium sind gestützt auf die intensive Mitarbeit an der Regelsetzung und der Kooperation mit zahlreichen europäischen Stellen. So wird die erfolgreiche Anwendung von Prüfverfahren für neue Technologien im Hinblick auf Energieeffizienz und Sicherheitstechnik unterschiedlicher Brennstoffanwendungen ermöglicht.

#### Abteilung Gasanwendung - Normung und Standardisierung

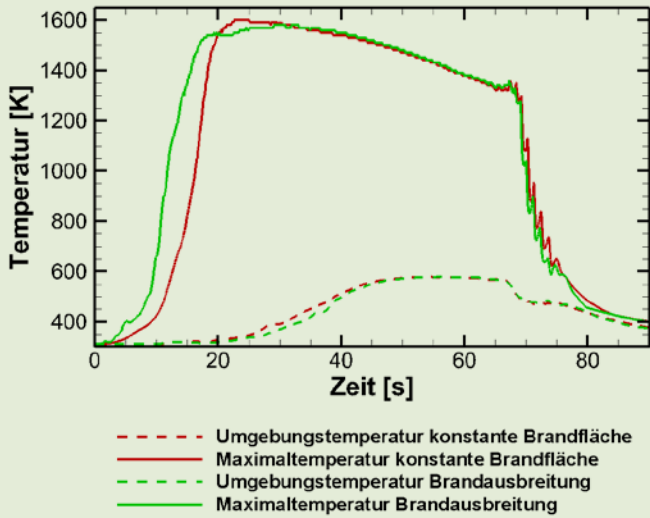
Auch im zurückliegenden Jahr setzten sich die Mitarbeiter/innen des Prüflaboratoriums im Rahmen der Regelsetzung, neben den DVGW-internen Gremien und Ausschüssen, vor allem auch in nationalen (ca. 35 Ausschüsse in NAGas, NHRS, FNH, DKE), europäischen (CEN, CENELEC, EU-Kommission)

und internationalen (IEC, ISO) Gremien (25 europäische und internationale Gremien zzgl. Arbeitsgruppen) für die Ziele des DVGW ein. 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) erfolgte. In vielen Technischen Komitees des CEN (z. B. TC 58, TC 69, TC 109, TC 234, TC 235, TC 236) wurde damit begonnen, Anforderungen und Prüfmethode zur Wasserstoffeignung der Bauteile und Geräte auszuarbeiten. Der systematische Ausbau der H<sub>2</sub>-Kompetenz im DVGW und damit der nationalen und europäischen Normung wird auch durch ein Investitionsprogramm unterstützt. Die Mitarbeiter der Prüfstelle haben weiterhin die Entwicklung von Zertifizierungsprogrammen (ZP's) der DVGW CERT GmbH als Brücke zur Normung aktiv unterstützt. Entsprechende umfassend entwickelte Prüf- und Zertifizierungsverfahren (u. a. ZP1100, ZP2100, ZP3100.20, ZP3100.100, ZP3411, ZP3502-20, ZP4110, ZP4111, ZP4400, 4500, ZP5100, ZP5101, ZP51xx, ZP8111) wurden bereits bei aktuellen Zertifizierungsprozessen und zugehörigen Prüfungen angewandt.

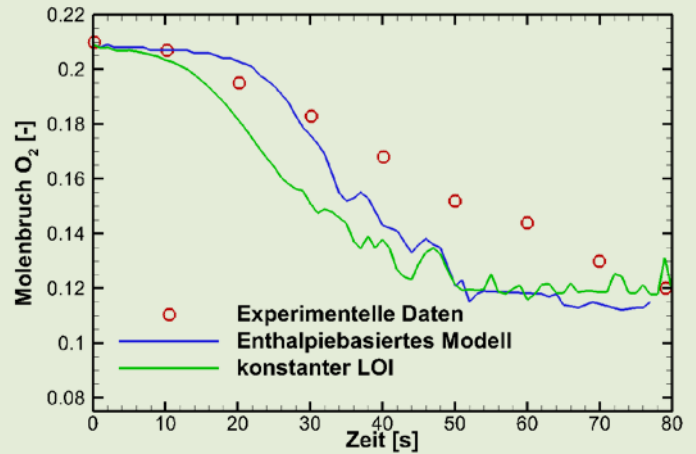
In der Normungsarbeit sind alle wichtigen Technischen Ausschüsse (TK's) des DVGW durch Mitarbeiter der Forschungsstelle besetzt. In mehreren Gremien sind Prüfstellenmitarbeiter in leitenden Funktionen tätig.

#### Charakterisierung der H<sub>2</sub>-Leckage durch Sicherheitsmembranen: MemGDR-H<sub>2</sub>

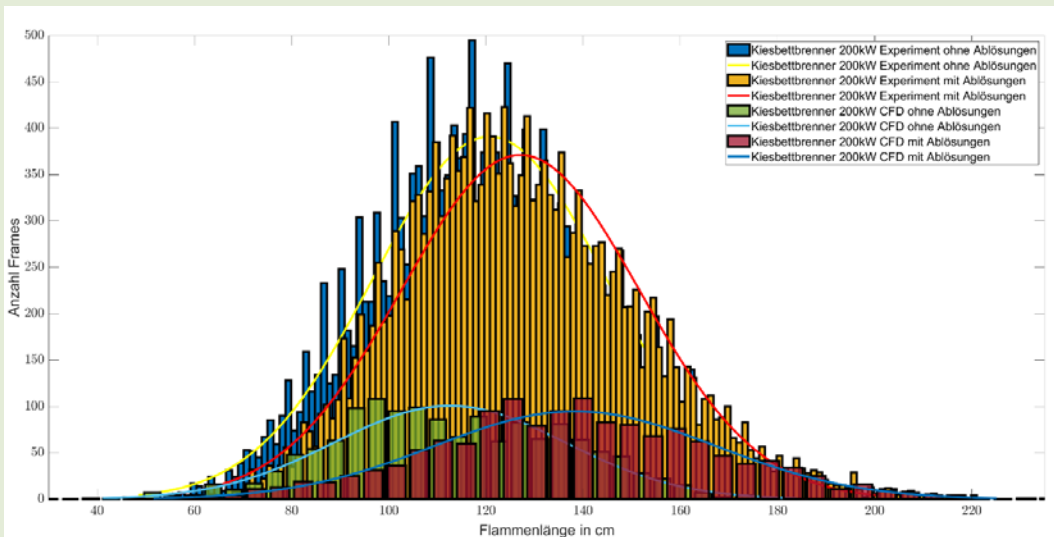
Zur Einhaltung der Klimaziele stellt die Umstellung des bestehenden Erdgasnetzes auf grünen Wasserstoff eine valide Option dar. Dies birgt den Vorteil, dass bestehende Infrastruktur weiterhin verwendet werden kann. Es konnte bereits im



**Bild 2.14:** Vergleich von Maximaltemperatur und Rauchgastemperatur bei einem brandlastkontrollierten Brandereignis



**Bild 2.15:** Verlauf des Sauerstoffmolenbruchs in der Brennerumgebung



**Bild 2.16:** Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für eine freie Flamme mit  $D=0,5\text{ m}$  und  $Q=200\text{ kW}$

Rahmen weiterer DVGW-Projekte gezeigt werden, dass die innerhalb des Erdgasnetzes verwendeten Gasdruckregelgeräte im Regelbetrieb  $H_2$ -tauglich sind. Die Funktion der Sicherheitsmembran wurde bisher jedoch noch nicht auf  $H_2$ -Tauglichkeit untersucht.

Bislang sieht die Norm nur eine Beurteilung des Gesamt-Leckageverhaltens vor, welches durch die Gesamtheit der selbsttätig wirkenden Sicherheitseinrichtungen charakterisiert wird, und keine dezidierte Prüfung der Sicherheitsmembran. Im Rahmen des Forschungsprojekts Mem-GDR- $H_2$  wurde zu ihrer Charakterisierung u.a. im  $H_2$ -Betrieb das Leckageverhalten von fünf GDR-Prüflingen erfasst, die gemäß DIN 33822 zugelassen sind und deren Arbeitsmembran gezielt beschädigt worden war.

Durch die ausgangsseitige Prüfgas-Beaufschlagung auf die Hauptstufe stand nur noch die Sicherheitsmembran zur Begrenzung der Leckage zur Verfügung. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 2.19** dargestellt.

Vor Durchführung der Leckageversuche wurde erwartet, dass sich mit steigender Druckbeaufschlagung die Sicherheitsmembran von innen an das Reglergehäuse anlegt und damit ein starker Abfall der Leckageraten einhergeht. Dieses Verhalten konnte z. B. an Prüfling A festgestellt werden, bei welchem ab einem Prüfdruck von 23 mbar die Leckagerate schlagartig nahezu auf den Nullpunkt absinkt. Bei anderen Prüflingen wie Prüfling D wiederum ist dieses Verhalten nicht zu erkennen, die Erhöhung des Prüfdrucks ist bis zum maximalen Prüfdruck mit einer Erhöhung der Lecka-

**Bild 2.17:** Smart Meter mit eine Lithium-Thionylchlorid-Batterie (links) und Versuchsaufbau (rechts)



**Bild 2.18:** Beflammung eines Smart Meters mit einer Lithium-Thionylchlorid-Batterie



geraten verbunden. Hierdurch wird der Grenzwert nach DIN 33822 für Luft überschritten. Die beschriebenen Messergebnisse sowie Interpretationsansätze sind in **Bild 2.20** aufgeführt.

Aufgrund der unterschiedlichen Verhaltensarten der Prüflinge sind hohe Leckgeraten nicht auszuschließen. Weitere Sicherheitsfunktionen wie z. B. ein Sicherheitsabsperrentil sind deswegen nötig. Im Rahmen von Funktionsprüfungen mit Luft wurde im Anschluss an die Leckageprüfungen gezeigt, dass diese Sicherheitseinrichtungen funktionieren und die Druckregelgeräte nicht funktionsfähig sind mit der betrachteten Schadensart. Wiederum ist nicht sicher, dass diese Sicherheitseinrichtungen ebenso auch bei geringeren Beschädigungen der Arbeitsmembran als im betrachteten Fall greifen.

Das Forschungsprojekt MemGDR-H<sub>2</sub> wurde im März 2026 abgeschlossen. Es ist in den entsprechenden DVGW-Gremien zu diskutieren, ob der Nachweis der Vermeidung von Gasaustritt bei beschädigter Arbeitsmembran durch selbsttätig wirkende Sicherheitseinrichtungen als Prüfung ins Regelwerk aufzunehmen ist. Außerdem könnten mögliche weitere Untersuchungen der Funktionsfähigkeit der Sicherheitseinrichtungen bei unterschiedlichen Schadfällen z. B. im Rahmen eines Folgeprojekts untersucht werden.

#### **Joint Actions on Compliance of Products (JACOP)**

Im Jahr 2025 beteiligte sich die Abteilung für Gasgeräte am DVGW EBI an einer Marktüberwachungsinitiative der Europäischen Kommission namens JACOP (Joint Actions on Compliance of Products). Im Rahmen dieser Initiative wurden Produkte geprüft, die auf dem europäischen Binnenmarkt in Verkehr gebracht wurden. Ziel des Projekts ist es, festzustellen, ob in Europa verkaufte Non-Food-Produkte den sektoralen Rechtsvorschriften der EU entsprechen.

Die JACOP-Ausgabe 2025 konzentriert sich auf neun Sektoren: Düngemittel, Bauprodukte, Gefahrstoffe, Kosmetika, Funkgeräte, Textilien, Aufzüge, Gasgeräte und persönliche Schutzausrüstung (PSA) (**Bild 2.21**).

Im Mittelpunkt der Prüfungen des DVGW EBI stand die Bewertung der Konformität von freistehenden Flüssiggasgeräten (LPG) mit der Verordnung (EU) 2016/426 über Geräte zur Verbrennung gasförmiger Brennstoffe (GAR). Ziel dieser Maßnahme war es, die administrativen und technischen Anforderungen zu überprüfen und sicherzustellen, dass die untersuchten Gasgeräte die in den einschlägigen EU-Normen festgelegten grundlegenden Anforderungen erfüllten. Bei den betreffenden Gasgeräten handelte es sich um Grills, tragbare Gasherde und freistehende Herde. Die Prüfung basierte auf drei harmonisierten europäischen Normen, die die wesentlichen Parameter abdecken, die zum Nachweis der Konformitätsvermutung erforderlich sind. Zu diesen Parametern zählen unter anderem Gasdichtheit, zuverlässige Zündung und Flammenstabilität, Flammenausfallsicherheit, Temperaturgrenzwerte für zugängliche Oberflächen sowie Gaskartuschen.

Eine Delegation von mehr als acht Marktüberwachungsbeamten aus ganz Europa sowie ein Vertreter der EU-Kommission besuchten die DVGW-EBI-Labore, wo die Ergebnisse der Bewertung von Robbin Bhagwan und Waldemar Jazkow vorgestellt und diskutiert wurden.

#### **RAWENI - Die Rolle von Ammoniak als Wasserstoffderivat zur direkten energetischen Nutzung in industriellen Anwendungen**

In Zusammenarbeit mit dem GWI und dem DBI werden an der DVGW-Forschungsstelle am EBI seit Oktober 2024 Fragestellungen in Bezug auf die direkte energetische industrielle Anwendung von Ammoniak mittels technisch-wissenschaftlichen Erkenntnissen beantwortet. Die Aufgabenpakete des EBIs konzentrieren sich unter anderem auf technische Untersuchungen zur NH<sub>3</sub>-Verbrennung im Labormaßstab sowie der Entwicklung eines neuen Brenner- und Verbrennungskonzeptes. Hierbei konnten erste Fortschritte an einem brennstoffflexiblen Drallbrenner gezeigt werden. Der am EBI neu entwickelte Brenner mit interner Luftstufung kann sowohl mit reinem Erdgas als auch mit Wasserstoff im Ammoniaklabor betrieben werden. Im Wasserstoffbetrieb konnten stöchiometrische Brennstoff-Luft-Gemische mit bis zu 80 % Ammoniak und im Erdgas-Betrieb bis zu 70 % Ammoniak zuverlässig stabilisiert werden (**Bild 2.22**). Nun folgen Untersuchungen an herkömmlichen industriellen Brennern, wie beispielsweise einem Metallfaserbrenner. Parallel wird das Konzept des Drallbrenners iterativ mittels Strömungssimulationen weiterentwickelt, um mit einer gezielten Brennstoff- und Strömungsführung einen reinen Ammoniakbetrieb zu ermöglichen. Das Projekt läuft noch bis Ende September 2026.

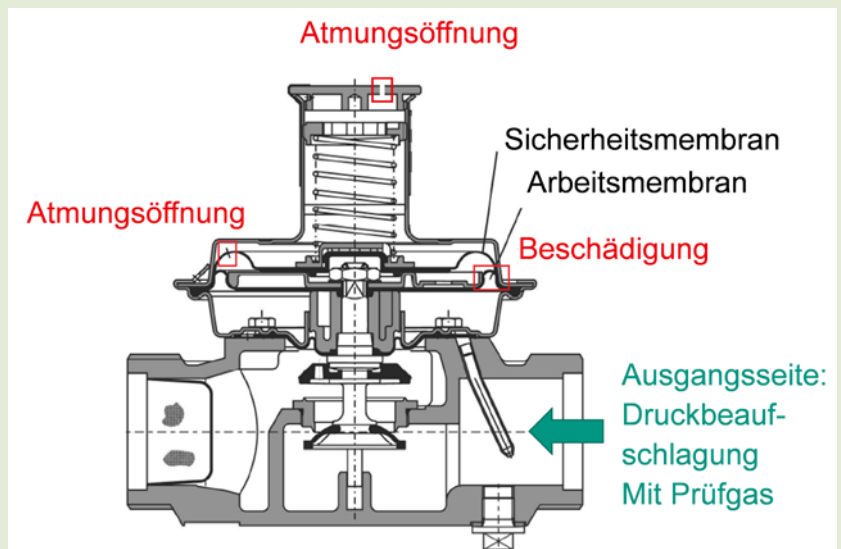
#### **MemKoWi**

Im Rahmen des Projekts sollen Membranen zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> aus Rauch- und Prozessgasen der Industrie erforscht und entwickelt werden. Das DVGW-EBI wird zusammen mit dem Projektkoordinator Hereon und dem FZJ Polymer- und keramische Membrane mit Modellgasmischungen charakterisieren (v.a. mit Permeationsmessungen auf einem Prüfstand). Im Rahmen der Membrancharakterisierung wurde das Permeationsverhalten von Polymermembranen bei der Separation von binären Gasmischungen und prozesstypischen Modellgasen mit drei Komponenten untersucht. Die daraus erhaltenen Membrandaten fließen in die Entwicklung eines eigenen OpenFOAM CFD-Modells ein.

#### **TransHyDE**

Es gab eine Projektbeteiligung bei der Versuchsauswertung im Bereich „Eichfähige Durchflussmessung“ zur Bestimmung der Messgenauigkeit verschiedener Durchflussmessverfahren bei der Anwendung mit Wasserstoff. Im Projekt wurde ein Transfernmal als Referenz entwickelt und validiert. Dieses Transfernmal bestand aus einer Blendenmessstrecke sowie einem Turbinenradzähler. Die Versuche belegen, dass eine Nutzung von in Erdgas kalibrierten Durchflussmessern für

Bild 2.19: Versuchsaufbau Leckageprüfung



Wasserstoff grundsätzlich möglich ist. Allerdings besteht weiterer Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der größeren Abweichungen im unteren Messbereich. Diese können zu einem höheren  $Q_{\min}$  des Zählers bei Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas führen. Für die Festlegung des jeweils kleinsten zulässigen  $Q_{\min}$  sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Die Messkampagnen liefern den Herstellern belastbare Daten zum Verhalten der Durchflussmesser und unterstützen die Weiterentwicklung sowie Anpassung der Geräte beim Wechsel von Erdgas zu Wasserstoff.

### NETZlabor H<sub>2</sub>-100 Öhringen

In einem Reallabormaßstab wurde die Umstellung eines bestehenden Erdgasnetzes auf 100 % Wasserstoff durchgeführt und die Gebäudeheizungen über mehrere Monate während der Heizperiode betrieben. Die Forschungsstelle hat im TRGI-Bereich dem zuständigen Sachverständigen zugearbeitet, die Inbetriebnahme der 100 % wasserstofftauglichen Gasgeräte begleitet und Emissionsmessungen im Betrieb der Anlagen durchgeführt.

### H<sub>2</sub> Ried

Im Pilotprojekt H2Ried soll durch Elektrolyse lokal erzeugter grüner Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden. Die rund 2.500 gewerblichen und privaten Gasanschlüsse werden dann mit einer 20 Vol.-% Wasserstoffbeimischung versorgt. Neben der abgeschlossenen Überprüfung des Verteilnetzes und der GDRM-Anlagen läuft derzeit die Erfassung der Gasgeräte im Bestand, um auch bei diesen die Tauglichkeit im Beimischbetrieb sicher zu stellen.

### 2.6 Veröffentlichungen in peer-reviewed Fachjournalen und Buchbeiträge:2025

- [1] Ahrendt, F.; Hagen, F. P.; Schmitz, R.; Trimis, D.; Ferraro, F. Investigation of ethanol blending on soot particle evolution in counterflow diffusion flames of a gasoline surrogate, 2025. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [2] Ahrendt, F.; Schmitz, R.; Hagen, F.P.; Vlavakis, P.; Trimis, D.; Ferraro, F. Investigation of ethanol blending on soot particle evolution in counterflow diffusion flames of a gasoline surrogate. Applications in Energy and Combustion Science 25 (2026),100435. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2025.100435>
- [3] Bauer, M.; Stelzner, B.; Habisreuther, P.; Schneider, M.; Weis, C.; Trimis, D. Experimental and numerical investigation of turbulent premixed H<sub>2</sub>-jet flame at high exhaust gas recirculation, 2025. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [4] Bauer, M.; Stelzner, B.; Habisreuther, P.; Schneider, M.; Weis, C.; Trimis, D. Experimental investigation of turbulent premixed H<sub>2</sub>-jet flames at high exhaust gas recirculation, Proceedings of the Combustion Institute 41 (2025), 105866. doi:10.1016/j.proci.2025.105866
- [5] Fedoryk, M.; Harth, S.; Sebbar, N.; Zhang F.; Trimis D. Development of a high-power density sulphur burner as a step for establishing sulphur as a carbon-free chemical energy carrier. Cost Action Cypher – 2<sup>nd</sup> General Meeting. Cracow – Poland, 19-21 May, 2025.
- [6] Frey, K.; Weis, C.; Trimis, D. The direct energetic utilisation of ammonia in industrial applications, 32. Deutscher Flammentag (2025), Paderborn, Deutschland, 15.-17. September 2025
- [7] Ghofrani, P.; Luu, T.D.; Stein, O.T.; Kempf, A.M. Cross-code comparison of carrier-phase DNS of turbulent iron particle cloud combustion, 2<sup>nd</sup> Workshop on Reacting Particle-Gas Systems, Magdeburg, Germany (2025).
- [8] Hagen, F. P.; Müller, J. H.; Störmer, H.; Stelzner, B.; Eggeler, Y. M.; Trimis, D. On nanoparticles in iron dust flames of Bunsen-type: Evolution of size distribution and hetero-coagulation with micron-sized particles. Fuel 398 (2025), 135598. doi:10.1016/j.fuel.2025.135598
- [9] Hagen, F.P.; Kroll, D.S.; Stelzner, B.; Trimis, D. Experimental characterization of laminar CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> diffusion flames, 2025, 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK

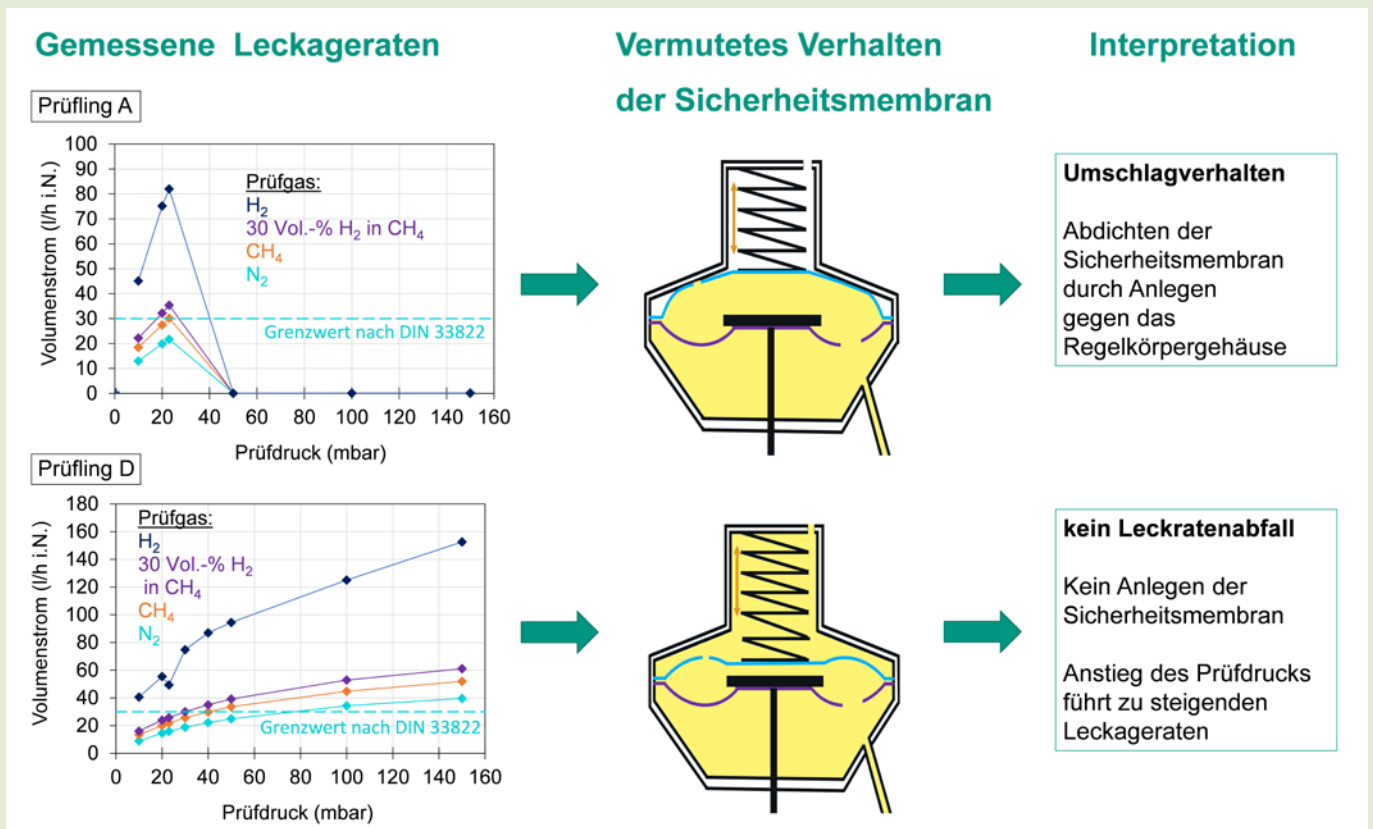
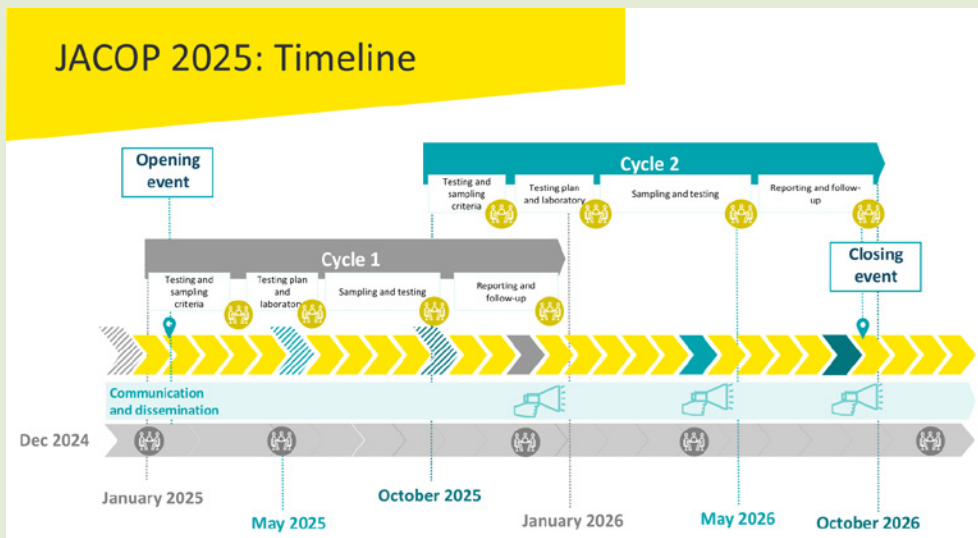
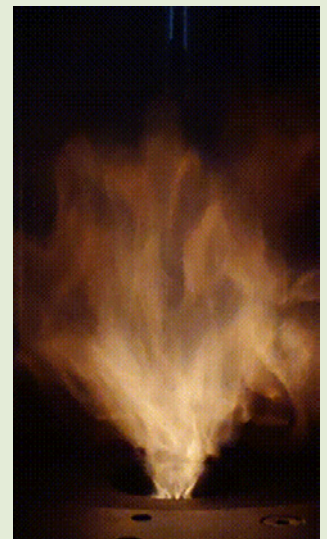


Bild 2.20: Leckageraten Prüflinge A und D

- [10] Hagen, F.P.; Braun, L.; Doronkin, D.E.; Fedoryk, M.; Seitz, M.; Müller, J. H.; Stelzner, B.; Grunwaldt, J.-D.; Trimis, D. In situ X-ray absorption spectroscopy to spatially resolve iron oxide phases in iron dust flames of Bunsen-type: Impact of flame conditions on phase evolution, 32. Deutscher Flammentag (2025), Paderborn, Deutschland, 15.-17. September 2025
- [11] Hartmann, N.; Kronenburg, A.; Zirwes, T.; Märker, D.; Luu, T.D.; Stein, O.T. Nanoparticle deposition in iron powder combustion – Effects of thermophoresis on deposition efficiencies, 32. Deutscher Flammentag (2025), Paderborn, Deutschland, 15.-17. September 2025
- [12] Heuer, C.; Bock-Seefeld, B.; Kaiser, P.; Weigelt, C.; Malczyk, P.; Brachhold, N.; Trimis, D.; Aneziris, C. G. C. 3D printing of alumina components via Fused Granulate Fabrication technology and solvent-free debinding of highly filled feedstocks comprising (LD)-polyethylene and cellulose, *Ceramics International*, 51 (28, Part B) (2025), 58287–58296. doi:10.1016/j.ceramint.2025.10.048
- [13] Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Rauch, R.; Scheiff, F.; Stein, O. T.; Wolf, M. Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2024, Teil 1, 2025. *gwf Gas + Energie*, 166 (6), 56–86
- [14] Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Rauch, R.; Scheiff, F.; Stein, O. T.; Wolf, M. Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2024, Teil 2, 2025. *gwf Gas + Energie*, 166 (7-8)
- [15] Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Rauch, R.; Scheiff, F.; Stein, O. T.; Wolf, M. Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2024, Teil 3, 2025. *GWf, Wasser - Abwasser*, 166 (6), 71–80
- [16] Hülsmann, H.M.; Kretzler, D.; Bauer, F.J.; Habisreuther, P.; Stelzner, B.; Trimis, D.; Hagen, F.P. Experimental and numerical investigation of ammonia counterflow diffusion flames, 2025, 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [17] Knapp, S.; Hagen, F. P.; Wagner, U.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Koch, T. Condensate Formation in Exhaust Systems during Cold Start, 2025. *SAE Technical Papers*, 2025–24, SAE International. doi:10.4271/2025-24-0081
- [18] Kretzler, D.; Puri, R.; Stelzner, B.; Zirwes, T.; Hagen, F. P.; Stein, O. T.; Trimis, D. Experimental and numerical investigation of non-premixed ammonia flames stabilized on a heated slot burner, *Proceedings of the Combustion Institute* 41 (2025), 105854. doi:10.1016/j.proci.2025.105854
- [19] Li, M.; Zhang, F.; Tavakkol, S.; Zirwes, T.; Stein, O.T.; Stapf, D. Simulation of plastics pyrolysis in fluidized bed with a lumped reaction kinetic model, 2<sup>nd</sup> Workshop on Reacting Particle-Gas Systems, Magdeburg, Germany (2025).
- [20] Luu, T.D.; Zhou, Y.; Shamooni, A.; Kronenburg, A.; Stein, O. T. Analysis of the Overlap of Devolatilisation and Char Conversion during Single Coal Particle Burning using a Detailed Multi-Step Kinetic Approach, 2025, 5th International Workshop on Oxy-Fuel Combustion (2025), Aachen, Deutschland, 19.–20. März 2025
- [21] Luu, T. D.; Göhringer, M.; Märker, D.; Stein, O. T. Characterisation of multi-stage self-ignition of iron particle clouds in sheared turbulence, 2025. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM), Edinburgh, UK, April 7-10, 2025
- [22] Mangipudi, M.; Denev, J. A.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Koch, T.; Debus, C.; Götz, M.; Zirwes, T.; Hagen, F. P.; Tofighian, H.; Wagner, U.; Braun, S.; Lanzer, T.; Knapp, S. M. Prediction of Hazardous Gaseous Emissions from a Gasoline Engine during Cold Starts Using Machine Learning



**Bild 2.21:** JACOP 2025–2026: Zeitplan mit zwei Projektzyklen vom Opening Event bis zum Closing Event inklusive begleitender Kommunikationsmaßnahmen



**Bild 2.22:** Fotografie einer turbulenten Ammoniak-Wasserstoff-Luft Drallflamme des am DVGW-ebi entwickelten Drallbrenners (80 vol.-% Ammoniakanteil im Brenngas)

- Methods, 2025. SAE Technical Paper Series, 2025–01, SAE International. doi:10.4271/2025-01-0321
- [23] Märker, D.; Hartmann, N.; Luu, T.D.; Nguyen, B.-D.; Scholtissek, A.; Hasse, C.; Kronenburg, A.; Stein, O.T. Modelling nanoparticle formation and deposition in burning iron microparticle arrays; 2025. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [24] Märker, D.; Hartmann, N.; Luu, T.D.; Kronenburg, A.; Stein, O.T. Nanoparticle formation and deposition during combustion of iron microparticles using Euler-Lagrange simulations, 32. Deutscher Flammentag (2025), Paderborn, Deutschland, 15.-17. September 2025
- [25] Nguyen, B.-D.; Scholtissek, A.; Li, T.; Ning, D.; Stein, O.T.; Dreizler A.; Hasse C. Nanoparticle formation in the boundary layer of burning iron microparticles: Modeling and simulation, Chem. Eng. J. 507:160039 (2025), doi:10.1016/j.cej.2025.160039
- [26] Puri, R.; Kretzler, D.; Bock-Seefeld, B.; Stelzner, B.; Brachhold, N.; Hubálková, J.; Trimis, D.; Aneziris, C.; Stein, O. T.; Zirwes, T. Influence of dispersion length for volume-averaged simulations of ammonia/air combustion in porous media burners, 2025. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [27] Puri, R.; Kretzler, D.; Bock-Seefeld, B.; Stelzner, B.; Brachhold, N.; Hubálková, J.; Trimis, D.; Aneziris, C.; Stein, O. T.; Zirwes, T. 2025. Influence of dispersion length on volume-averaged simulations of ammonia/air combustion in porous media burners, Proceedings of the Combustion Institute 41 (2025), 105856. doi:10.1016/j.proci.2025.105856
- [28] Puri, R.; Zirwes, T.; Stein, O.T. Pore-resolved simulations of ammonia combustion in porous inert media, 32. Deutscher Flammentag (2025), Paderborn, Deutschland, 15.-17. September 2025
- [29] Puri, R.; Zirwes, T.; Stein, O.T. Direct pore-level simulation of ammonia combustion in multi-zone porous media burners, 20<sup>th</sup> Internat. Conf. Numerical Combust. (ICNC), Rome, Italy (2025).
- [30] Richter, J.; Roeb, J.; Zhang, F.; Stapf, D.; Stein, O.T.; Jakobs, T.; Kolb, T. Primary breakup of gas-assisted liquid sheet atomizers - experiments and simulation, 12<sup>th</sup> Internat. Conf. on Multiphase Flow, Toulouse, France, (2025).
- [31] Rieke, L.; Dinkov, I.; Steimer, S.; Schelb, D. Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von Schwelbränden in Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen unter verschiedenen Luftbedingungen, 32. Deutscher Flammentag (2025), Paderborn, Deutschland, 15.-17. September 2025
- [32] Roeb, J.; Richter, J.; Jakobs, T.; Kolb, T.; Scheiff, F.; Stapf, D.; Stein, O.T. Volume-of-Fluid LES modeling of primary breakup in a dual-gas-assisted sheet atomizer under pulsating conditions, Poster: 21<sup>st</sup> Multiphase Flow Workshop - Conference and Short Course, Dresden, Germany (2025)
- [33] Russo, A.; Genot, A.; Zirwes, T.; Stein, O.T.; Trimis, D.; Roncen, R. Flame Dynamics and Anchoring in a Simplified Porous Material, 2025. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [34] Saggese, C.; Whitesides, R.; Wagnon, S. W.; Chatterjee, T.; Hagen, F. P.; Vlavakis, P.; Schraud, N.; Trimis, D. Soot formation and precursor chemistry in Counterflow flames of aviation fuel surrogates, Proceedings of the Combustion Institute, 41 (2025), 105816. doi:10.1016/j.proci.2025.105816
- [35] Schelb, D.; Dinkov, I. Verhalten von Lithium-Thionylchlorid-Batterien bei Belastungen, BRANDSchutz, [8/2025]
- [36] Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Bozzelli, J. W.; Trimis, D. Computational investigation of the isomers formed from the reaction S2 + O2, 2025. Journal of Sulfur Chemistry, 46 (3), 416–434. doi:10.1080/17415993.2025.2473740
- [37] Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D. 2025. Primary Reactions of Oxygen with Phenanthryl C<sub>14</sub>H<sub>9</sub>•: Thermochemistry and Kinetics, 2025. 12<sup>th</sup>

- European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [38] *Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.* A computational study of the oxidation of the phenanthryl radical  $C_{14}H_9$ : Thermochemistry and possible reaction pathways, International Journal of Chemical Kinetics. In production, November 2025.
- [39] *Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.* Primary Reactions of the Attack of Oxygen on Phenanthryl  $C_{14}H_9$ : Thermochemistry and kinetics. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [40] *Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.* Numerical Study of the Dissociation Reactions of S8 and the Resulting Fragments S7, S6, S5, S4 and S3 Thermochemistry and kinetics. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [41] *Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.* Reactions of S8 with  $O_2$  – Primary attack and subsequent fragmentation reactions: Thermochemistry of involved species. Proceeding of the 13<sup>th</sup> Mediterranean Combustion Symposium, Corfu – Greece 1-5 June 2025.
- [42] *Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Harth, S.; Fedoryk, M.; Trimis, D.* Dissociation reactions of S8 and oxidation reaction of S8 with  $O_2$ . Cost Action Cypher – 2nd General Meeting. Cracow – Poland, 19-21 May, 2025.
- [43] *Seitz, M., Kannengießer, M.P., Stelzner, B., Hagen, F.P., Braun, L., Kaltenbach, J., Märkle, K., Peterlechner, M., Spielmann, J., Doronkin, D.E., Deutschmann, M.P., Grunwaldt, J.-D., Eggeler, Y.M., Kramm, U.I., Nirschl, H., Trimis, D.* 2026. Reduction of micron-sized iron oxide particles with high initial porosity in a fluidized bed reactor using hydrogen: Morphology and phase analysis. Fuel 405, 136422. doi:10.1016/j.fuel.2025.136422
- [44] *Shamooni, A.; Cheng, R.; Zirwes, T.; Tofighian, H.; Stein, O.T.; Kronenburg, A.* Superresolution of turbulent velocity fields in two-way coupled particle-laden flows, Phys. Fluids 37:093383 (2025). doi:10.1063/5.0288515
- [45] *Shamooni, A.; Cheng, R.; Zirwes, T.; Stein, O.T.; Kronenburg, A.* Super-resolution reconstruction of scalar fields from the pyrolysis of pulverised biomass using deep learning. Proceedings of the Combustion Institute 41, (2025), 105982, doi:10.1016/j.proci.2025.105982
- [46] *Singh, S.; Amerighi, M.; Scopolini, N.; Andreini, A.; Harth, S. R.; Trimis, D.* Effect of  $H_2$  and Jet-A1 fuel split on flame stability and pollutant emissions from low-swirl burner. Proceedings of the Combustion Institute 41, (2025), 105858. doi:10.1016/j.proci.2025.105858
- [47] *Singh, S.; Harth, S.R.; Trimis, D.* Pollutant emissions and flame stability limits of a fuel-flexible combustor for  $H_2$  and Jet-A1, 32. Deutscher Flammentag (2025), Paderborn, Deutschland, 15.-17. September 2025
- [48] *Thaeter, G.; Carbone, M.; Stein, O.T.; Frohnapfel, B.* Analysis of flame front velocities in planar iron particle cloud flames, 2025. 12<sup>th</sup> European Combustion Meeting (ECM 2025), Edinburgh, April, 7-10, Scotland, UK
- [49] *Vlavakis, P.; Hagen, F. P.; Loukou, A.; Trimis, D.* Soot formation in iso-octane counterflow diffusion flames, Combustion and Flame 282 (2025), 114513. doi:10.1016/j.combustflame.2025.114513
- [50] *Zhu, W., Stelzner, Z., Trimis, D.* Experimental study turbulent interaction near the active wall at high Reynolds numbers using 2D-PIV and tracer PLIF. 15<sup>th</sup> International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Dubrovnik, Croatia, September 22-24, 2025 Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2025, Teil 3

### 3. Aktivitäten der Professur Wasserchemie und Wassertechnologie und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut

#### 3.1 Forschung und Lehre

##### Forschung

Ende des Sommersemesters 2026 scheidet der derzeitige Stelleninhaber der Professur Wasserchemie und Wassertechnologie Harald Horn aus dem Amt. Erfreulicherweise hat bereits im Dezember 2025 Frau Dr. Marta Markiewicz von der TU Dresden den Ruf auf die Stelle angenommen. In der Umbruchphase ist die Anzahl der Doktoranden auf einem sehr niedrigen Stand und die neueingeworbenen Projekte aus 2025 werden vor allem von Frau Dr.-Ing. Florencia Saravia (Leiterin des Bereichs Wasserchemie und Wassertechnologie an der DVGW-Forschungsstelle) und von Frau Dr. Andrea Hille-Reichel verantwortet. Dabei ist das vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg geförderte Projekt zur Skalierbarkeit von Gasfermentationsprozessen in Membranbiofilmreaktoren von Frau Hille-Reichel sehr innovativ, da es den Einsatz von Wasserstoff mit der sehr eleganten Membrantechnik verkoppelt. Frau Saravia war als verantwortliche Wissenschaftlerin für die DVGW-Forschungsstelle erfolgreich. „Untersuchungen zum Schutz des Untergrundes vor modifizierten Geothermalfliuiden (SCHUTZGRUND)“ beschäftigt sich mit der Lithiumgewinnung und möglichen

Harald Horn, Andrea Hille-Reichel, Florencia Saravia

Auswirkungen auf die aquatische Umwelt und wird vom BMFTR gefördert. Das Projekt ergänzt sich sehr gut mit dem bereits laufenden und vom BMWF geförderten Projekt „Thermion – Extraktion von Lithium aus thermalen Solen – Teilvorhaben: Entwicklung von Vor- und Nachbehandlungsstrategien für die Rückgewinnung von Lithium“. Im Rahmen der Bekanntmachung zum Wasser-Energie-Nexus ist Frau Saravia mit ihrem Projektvorschlag „Sektorübergreifende Nutzung von kommunalem Abwasser für die Produktion von grünem Wasserstoff zur Stärkung der Versorgungssicherheit 2035 (ReSynergy)“ zum Vollartrag aufgefordert worden.

Die laufenden und neuen Projekte sind sehr stark getrieben von der Kompetenz im Bereich der Membranverfahren. Zum einen werden die verschiedenen Membranen zur Trennung eingesetzt, zum anderen dient die Membran bei den Membranbiofilmreaktoren als Aufwuchsfläche für Mikroorganismen, die mit einem gasförmigen Substrat (Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid) versorgt werden. Zusätzlich steht in der Wasserchemie und Wassertechnologie am EBI für die verschiedenen Projekte eine hohe Kompetenz im Bereich der bildgebenden Verfahren zur Verfügung, die für die Prozessaufklärung eingesetzt werden kann [7, 9, 15, 18, 19].

Auf den nächsten Seiten finden Sie zwei ausführlichere Berichte zu Projekten im Themenfeld „Mikrobielle (Einkammer-) Elektrolysezellen für die Nutzung von Abfallstoffströmen“ und „Fischer-Tropsch-Abwasser: Behandlung mittels anaerobem Membranbioreaktor“ sowie die Berichte zu den in 2025 abgeschlossenen Promotionsarbeiten. **Tabelle 3.1** in Kap. 3.2 zeigt alle Projekte, die im laufenden Berichtsjahr 2025 abgeschlossen, fortgeführt oder neu eingeworben wurden.

### Lehre

Im Studiengang Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik (CIW) haben sich im WS 25/26 130 Bachelor- und 75 Masterstudierende immatrikuliert (WS 24/25: 114 für CIW-Bachelor und 87 Masterstudierende). Die Zahlen im Bioingenieurwesen (BIW) sind im WS 25/26 angestiegen, 84 Bachelor- und 23 Masterstudierende (WS 24/25: 50 für BIW-Bachelor und 17 Masterstudierende).

Im englischsprachigen Master-Studiengang „Water Science and Engineering“ (WSE) wurden im Studienjahr 2025 28 Studierende immatrikuliert. Die Leitung des KIT drängt für die Zukunft verstärkt auf englischsprachige Studiengänge. Damit wird die Attraktivität der Hochschule erhöht. Die Erfahrungen mit dem WSE aus den letzten zehn Jahren zeigt aber auch, dass durch die extrem hohen Bewerbungszahlen der Aufwand, die geeigneten Kandidaten:innen herauszusuchen, stark ansteigt.

Nach wie vor sind die englischsprachigen Lehrangebote aus der Wasserchemie und Wassertechnologie in den Masterstudiengängen sehr stark nachgefragt. „Water Technology“, „Membrane Technology in Water Treatment“, „Fundamentals of Water Quality“, „Biofilm Systems“ und „Industrial Wastewater Treatment“ bieten einen sehr guten Überblick zur Schnittstelle Wasserqualität/Wasseraufbereitung. Die hohe Beteiligung an den Veranstaltungen spiegelt sich auch in der großen Nachfrage an experimentellen Abschlussarbeiten wider. Im Jahr 2025 konnten insgesamt 13 Arbeiten abgeschlossen werden (zwei Bachelorarbeiten, drei Study-Projektarbeiten, acht Masterarbeiten).

### Internationale Kooperationen in Forschung und Lehre

Seit Oktober 2024 ist der Alexander von Humboldt-Stipendiat Dr. Chao Zhang von der South China Normal University am Engler-Bunte-Institut zu Gast. Chao Zhang arbeitet im Bereich der Spurenstoffe und verwendet Satellitendaten zur Identifikation der Verteilung solcher Stoffe in Oberflächengewässern.

Prof. Shilpi Verma (Department of Energy and Environment, Thapar Institute of Engineering & Technology, Patiala-147004, Punjab, India) war 2025 für zwei Monate am EBI. Das Projekt, in dem der photokatalytische Abbau von PFAS in wässrigen Lösungen beforscht wird, wird von WiSER – Women Involvement in Science & Engineering Research finanziert.

### Promotionen

2025 wurden vier Promotionen fertiggestellt. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Arbeiten kurz zusammengefasst.

Im Juni 2025 verteidigte Herr M.Sc. **Andreas Netsch** seine Dissertation „On-line monitoring of electroactive biofilms on the electrodes of bioelectrochemical systems by means of heat transfer biofilm sensors“. Zweitgutachter war Prof. Dirk Holtmann vom KIT.

Für die Regelung des optimalen Betriebs von bioelektrochemischen Systemen (BES) im Speziellen und Biofilmreaktoren im Allgemeinen könnte die Dicke der Biofilme als relevante Regelgröße herangezogen werden, sofern eine geeignete Messmethode zur kontinuierlichen Erfassung zur Verfügung stünde.

Derzeit sind am Markt nur wenige Sensoren verfügbar, die diesen Anforderungen gerecht werden. Die Firma Lagotec aus Magdeburg vertreibt seit rund zwei Jahrzehnten den sogenannten DEPONSENS. Dieser basiert auf der Abschwächung des Wärmeübergangs infolge der Besiedlung einer Oberfläche mit Biofilm. Herr Netsch hat dieses System im Rahmen seiner Doktorarbeit hinsichtlich der Beschaffenheit der Aufwuchsfläche sowie der Oberflächenstruktur eingehend untersucht.

Zunächst vergleicht Herr Netsch das Signal des Sensorsystems für eine Metalloberfläche (Edelstahl) mit dem eines Elektrodenkompositmaterials (in Polypropylen eingebettetes Graphit). Letzteres wird in bestehenden BES häufig als Anodenmaterial eingesetzt. Der Versuchsaufbau gewährleistet vergleichbare Strömungsbedingungen durch die Installation der Sensoren in Rohren mit identischem Durchmesser. Die Ergebnisse zeigen eine eindeutige Abhängigkeit des Sensorsignals von der tatsächlichen Biofilmdicke. Für das metallische Material weisen die Sensoren eine um den Faktor fünf höhere Sensitivität auf. Offensichtlich wachsen die Mikroorganismen auf Stahl besser und schneller als auf dem Kompositmaterial. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Sensoren materialabhängig sowie in Abhängigkeit von den Kultivierungsbedingungen stets kalibriert werden müssen. Für die Heizquelle, mit der der Wärmeübergang induziert wird, empfiehlt Herr Netsch eine Temperaturdifferenz von 5 K.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen entwickelt Herr Netsch eine Fließzelle, in die einerseits der Biofilmsensor integriert wurde und die andererseits die Möglichkeit bietet, den Biofilm mittels optischer Kohärenztomographie (OCT) parallel zu beobachten. Die Fließzellen werden mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten betrieben, um den Einfluss des Wärmetransports vom Sensor zu quantifizieren. Dabei kommen erneut die im ersten Versuchsaufbau verwendeten Materialien zum Einsatz. Durch die kontinuierliche Erfassung des Sensorsignals sowie der Biofilmdicke und -struktur mittels OCT generiert Herr Netsch qualitativ hochwertige Datensätze. Die Ergebnisse zeigen eine klare Abhängigkeit des Sensorsignals von der Überströmungsgeschwindigkeit. Auch die mittels OCT ermittelten Strukturparameter wie Rauheit und Porosität korrelieren mit den Strömungsbedingungen. Der

besondere Wert dieses Abschnitts liegt in dem entwickelten, vergleichsweise einfachen Modell, das die verschiedenen Wärmeübergangslimitierungen in der Fließzelle berücksichtigt. Eine derart fundierte Vorgehensweise wurde bislang bei der Entwicklung von Biofilmsensoren nicht vorgelegt.

Im abschließenden Ergebnisteil werden die Fließzellen als BES betrieben und mit Belebtschlamm aus einer Kläranlage inokuliert. Dieser Abschnitt stellt eine konsequente Weiterentwicklung der zuvor gewonnenen Erkenntnisse dar. Es gelingt Herrn Netsch, die vom mikrobiellen Konsortium erzeugte Stromdichte an der Anode überzeugend mit der Biofilmdicke zu korrelieren. Dabei greift er sowohl auf die OCT-Daten als auch auf die kontinuierlichen Messdaten des Sensors zurück. Der Wert dieser Ergebnisse liegt zum einen in der Abbildung der räumlichen Variabilität der Biofilmdicke über die mittels OCT erfasste Aufwuchsfläche, wodurch ein realistisches Bild der tatsächlichen Verhältnisse entsteht. Zum anderen zeigt sich, dass das gemittelte Signal des Biofilmsensors sehr gut mit der Stromdichte korreliert. Herr Netsch hat mit der vorgelegten Arbeit zweifellos einen grundlegenden Beitrag zum Online-Monitoring von Biofilmbewuchs geleistet.

Im Juli 2025 verteidigte Herr M.Sc. **Tim Schwarzenberger** seine Dissertation „Verification of a Combined Variable Approach for the Microbiological Validation of Monochromatic- and Polychromatic UV Systems“. Zweitgutachter war Prof. Matthias Franzreb vom KIT.

Herr Schwarzenberger hat seine Promotion am TZW durchgeführt und sich im Wesentlichen mit der Standardisierung der Trinkwasserdesinfektion mit UV-Strahlungsquellen auseinandergesetzt. Typischerweise wird bei der UV-Desinfektion die Fluence in  $\text{J}/\text{m}^2$  als Regelgröße verwendet. Der Konflikt entsteht, wenn tatsächlich nur ein Teilbereich der UV-Strahlung die Mikroorganismen bzw. Viren deaktiviert. Dann reicht die eingetragene Energie nicht aus, sondern man muss spezifizieren, welche Wellenlänge tatsächlich die Desinfektion treibt. Dafür können Wirkungsspektren (Action Spectrum) verwendet werden, die die Desinfektionswirkung dann über den ganzen UV-Bereich abdecken. Die Komplexität steigt noch zusätzlich, da es abhängig von den zu deaktivierenden Organismen sehr verschiedene Wirkungsspektren gibt.

Herr Schwarzenberger hat im Rahmen seiner Doktorarbeit die Abhängigkeit der Inaktivierung von der Wellenlänge und der Fluence für zwei Modellorganismen charakterisiert. Für die von ihm durchgeführten Versuche verwendet er *Bacillus subtilis* Sporen und MS2 Phagen.

In Schritten von 5 bis 10 nm zeigt Herr Schwarzenberger die Elimination von *Bacillus subtilis* Sporen für einen Fluence-Bereich zwischen 50 und  $800 \text{ J}/\text{m}^2$ . Er zeigt sehr schön, dass bei Wellenlängen über 290 nm keine nennenswerte Elimination der *Bacillus subtilis* Sporen stattfindet. Mit diesen Daten berechnet er das Wirkungsspektrum für den UV-Bereich.

Ein weiteres Ergebnis zeigt die Deaktivierung der MS2 Phagen, die oft als Surrogat für Viren genommen werden. Im Vergleich zu den *Bacillus subtilis* Sporen werden abweichende Kurven-

verläufe gefunden. So steigt die Inaktivierung bei den einzelnen Wellenlängen nicht linear mit der Fluence. Auch wird noch eine, wenn auch geringe, Inaktivierung bei 290 nm erzielt.

Im letzten Teil der Arbeit werden die erzielten Ergebnisse (die Wirkungsspektren) für eine Simulation in einem durchströmten UV-Reaktor verwendet. Die Modelldaten (Leistung der UV-Lampe, Strömungsverhältnisse, UV-Durchlässigkeit des strömenden Mediums) sind so gewählt, dass sie nahe an einer realen Anlage sind, wie sie zur Trinkwasserdesinfektion verwendet wird. In diesem Abschnitt führt Herr Schwarzenberger die kombinierte Variable (Combined variable) ein, in die die eingetragene Leistung im Reaktor, der Volumenstrom und die UV-Sensitivität des zu deaktivierenden Organismus eingehen. Letzteres wurde im Wesentlichen in den ersten beiden Abschnitten ermittelt. Es gelingt, die verschiedenen Einflussgrößen in relativ komplexen Polynomen zu integrieren. Final zeigt er für zwei Szenarien mit 2,5 und  $250 \text{ m}^3/\text{h}$  Volumenstrom für vier verschiedene Organismen eine klare Abhängigkeit, die es ermöglicht, die Desinfektionsleistung vorherzusagen. Im Hinblick auf den zukünftigen Einsatz der UV-Desinfektion bei der Trinkwasseraufbereitung leistet die Arbeit von Herrn Schwarzenberger einen fundamentalen Beitrag.

Im August 2025 verteidigte Herr M.Sc. **Nikhil Prakash** seine Dissertation „Processing particulate organic matter from municipal wastewater into a particle-free short-chain fatty acids stream for bio-based products recovery“. Zweitgutachter war Prof. Tobias Morck von der Universität in Kassel.

Das Land Baden-Württemberg und die Europäische Union hatten das Verbundvorhaben KoalAplan gefördert, in dessen Rahmen die partikuläre organische Fracht im kommunalen Abwasser in Wertstoffe umgewandelt werden sollte. Die Arbeit von Nikhil Prakash deckt den ersten Schritt in der Prozesskette von KoalAplan ab, die Umwandlung der partikulären Fracht in einen partikelfreien Stoffstrom mit hohen Konzentrationen an organische Säuren durch Dunkelfermentation.

Herr Prakash hat sehr viel experimentelle Arbeit investiert, um die optimalen Betriebsbedingungen für die Fermentation von partikulärem, organischen Material aus kommunalem Abwasser zu identifizieren. Es gelingt ihm sehr elegant, den optimalen pH-Wert Bereich, die Temperatur und die hydraulische Verweilzeit (HRT) für die Feststoffe aus der Kläranlage in Büsnau zu ermitteln. Dazu hat er seine Reaktoren im semikontinuierlichen Modus betrieben, den pH-Wert zwischen 5 und 10 und die Temperatur zwischen 22 und  $32 \text{ }^\circ\text{C}$  variiert. Beim Betrieb der Fermenter für die Produktion von organischen Säuren soll die Produktion von Methan verhindert werden, was über die HRT geregelt werden kann. Herr Prakash kann hier sehr klare Aussagen für den optimalen Betrieb machen und empfiehlt  $< 48$  Stunden HRT, einen pH von 7 und eine optimale Temperatur von  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Für eine weitere biotechnologische Prozessierung (Bioraffinerie) müssen die organischen Säuren in einem partikelfreien

Stoffstrom vorliegen. Herr Prakash setzt die keramische Mikrofiltration ein, um die Feststoffe aus dem Fermenter abzutrennen und einen partikelfreien Prozessstrom zu erzeugen. Zunächst wird ein Großteil der Feststoffe mit einer Kammerfilterpresse abgetrennt. Das Trübwasser aus der Presse wird dann in zwei cross-flow Keramikmembranen final behandelt. Dabei fokussiert Herr Prakash auf das Fouling und die Gegenmaßnahmen. Der Einsatz von Pumpleistung auf Grund der hohen Überströmgeschwindigkeiten von rund 3 m/s ist recht erheblich und damit ein Parameter, der optimiert werden kann. Die vorliegenden Ergebnisse helfen, das Fouling an der Keramikmembran in Abhängigkeit von Überströmgeschwindigkeit und Transmembrandruck zu verstehen und damit die Reinigungsschritte (Rückspülen) im Hinblick auf Frequenz und Spüldauer zu benennen. Generell wird die Optimierung des Betriebs der Kammerfilterpresse mit einem Flockungshilfsmittel und die Kombination mit der Mikrofiltration bearbeitet. Diese Fest-/Flüssigtrennung ist der entscheidende Schritt hin zu einer Bioraffinerie. Als Ergebnis liegt dann ein partikelfreier Strom mit einem Gemisch an organischen Säuren in Konzentrationen vor, die anschließend unter biotechnologischen Bedingungen weiter prozessiert werden können und nicht mit den stark verdünnten Bedingungen des kommunalen Abwassers vergleichbar sind. Mit verschiedenen realen Abläufen des Fermenters werden schließlich Permeate mit Konzentrationen an organischen Säuren im Gramm pro Liter Bereich erzeugt. Dieser Aufbereitungsschritt kann stabil gefahren werden. Final zeigt Herr Prakash eine Massebilanz für die Transformation von partikulärem zu gelöstem organischen Kohlenstoff, die ein wesentliches Ergebnis der Doktorarbeit abbildet und das Potenzial der Rückgewinnung des Kohlenstoffs aus kommunalem Abwasser aufzeigt.

Im Oktober 2025 verteidigte Herr M.Sc. **Lukas Lesmeister** seine Dissertation „Untersuchung einer Verfahrenskombination aus Aktivkohlefiltration und Anionenaustausch zur Entfernung von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen in der Trinkwasseraufbereitung“. Zweitgutachter war Prof. Lutz Ahrens von der Universität in Uppsala.

Herr Lesmeister hat den experimentellen Teil seiner Doktorarbeit am TZW durchgeführt. Anlass der Arbeit war die Frage, wie die Wasserversorgung in Rastatt in Zukunft die geforderten Grenzwerte für per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen einhalten kann. Herr Lesmeister beschreibt die möglichen Anionenaustauscher, die für einen Einsatz zur Entfernung von PFAS aus dem Wasser in Frage kommen. Insgesamt wurden von Herrn Lesmeister neun PFAS in die Untersuchungen einbezogen, darunter waren zwei Sulfonsäuren (Trifluormethan- und Perfluorbutansulfonsäure). Zunächst wurden sieben basische Anionenaustauscher auf ihr Adsorptions- bzw. Austauschverhalten mit Hilfe von Schüttelversuchen und dann auch Laborsäulenversuchen getestet. Drei Anionenaustauscher werden am Ende für weitere Versuche ausgewählt: A111 ((4-ethylphenyl)-N,N-di-

methylmethanaminium), M600 (N-[(4-ethylphenyl)methyl]-2-hydroxy-N,N-Dimethylethan-1-aminium) und PSR2Plus ((4-ethylphenyl)-N,N,N-tributylmethanaminium).

Mit den gewählten Austauscherharzen wurden weitergehende Untersuchungen zum Einfluss von Wasserinhaltsstoffen auf das Austauschverhalten durchgeführt. Dabei wurde konkret auf Chlorid und Sulfat geschaut, die in realistischen Konzentrationen im Bereich von Trinkwässern angeboten wurden. Weiterhin wurde der Einfluss von NOM getestet. Die Ergebnisse zum Einfluss der Anionen sind erwartbar. Das zweiwertige Ion Sulfat hat unstrittig den größten Einfluss auf die Adsorptionskapazität der eingesetzten Ionenaustauscher. Dabei zeigt Herr Lesmeister sehr schön, dass mit zunehmender Anzahl von C-Atomen in den PFAS der Einfluss geringer wird und bei C7 gar keinen Einfluss mehr hat. NOM vom Hohlohsee mit 5 mg/L DOC dosiert wird von den eingesetzten Ionenaustauschern zurückgehalten. Herr Lesmeister kann mit Hilfe der LC-DOC Messung sehr schön zeigen, dass die drei Ionenaustauscher einen sehr unterschiedlichen Rückhalt im Bezug auf die Größenfraktionen des DOC haben.

Herr Lesmeister entwarf und betrieb im Rahmen der Promotion Pilotanlagen im Wasserwerk in Rastatt. Bei dem zweistufigen Verfahren wurde eine vorgeschaltete Aktivkohleeinheit und ein nachgeschalteter Ionenaustauscher mit den Austauscherharzen A111 und M600 gewählt. Der Ionenaustauscher PSR2Plus wurde als einstufige Pilotanlage gewählt. Im Rahmen der Versuche wurde neben der Beladungsphase auch die Regeneration getestet. Bei der Regeneration wurde für M600 neben Natriumnitrat auch Natriumchlorid verwendet. Für A111 wurde bei der Regeneration Natriumhydroxid eingesetzt. PSR2Plus wurde als erste Filterstufe ohne Regeneration betrieben. Für das verwendete Modellwasser aus dem Wasserwerk in Rastatt gab es bei den beiden Aktivkohlen nach 12.000 bzw 18.000 Bettvolumina eine Überschreitung des PFAS 20 Grenzwertes von 100 ng/L. Der Ionenaustauscher PSR2Plus konnte mit 44.000 BV bis zum Durchbruch betrieben werden. Im Hinblick auf den Betrieb der beiden Ionenaustauscher als zweite Filterstufe liegt der Wert der Arbeit von Herrn Lesmeister aber darin, dass er ein sehr gut eingestelltes Regenerationsregime gefahren hat, mit dem er die Grenzen der beiden Austauscherharze A111 und M600 klar aufzeigen kann. Mit A111 gelingt ein Betrieb über 60.000 BV, ohne dass der Grenzwert für PFAS 20 gerissen wird. Die beigefügte Analyse der Kosten ist für die Anwendung des Verfahrens hilfreich, und offensichtlich kann Herr Lesmeister hier einen Beitrag für die zukünftige Aufbereitung von belasteten Trinkwässern leisten.

### 3.2 In Arbeit befindliche, im Jahre 2025 abgeschlossene und neu begonnene Forschungsprojekte

Die 2025 in den Forschungsschwerpunkten Wasserqualität, Wassertechnologie, Biologische Abwasserreinigung und

**Tabelle 3.1:** In Arbeit befindliche, im Jahr 2025 abgeschlossene\* und neu begonnene Forschungsprojekte.

Schwerpunkt	Projekt-mitarbeitende	Thema	Förderung
Wasserqualität	Stephan Zimmermann	Verhalten von Krebsmedikamenten bei Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung	KIT
Wasser-technologie	Mina Ahsani Florenca Saravia	Entwicklung eines Überwachungssystems für eine effiziente Erkennung von Biofouling in Umkehrosiose-Anlagen*	ZIM-Kooperationsprojekte / BMWK
	Mehran Aliaskari Yair Morales Michael Wagner Ben Schädlich Pratobers Simiyu Mina Ahsani Jonas Ullmann Florenca Saravia	PtX-Wind – Offshore Power-to-X-Prozesse, Technologie-plattform H <sub>2</sub> Mare (Verbundvorhaben)*	Bundeministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)
	Mélanie Apitzsch-Delavault Florenca Saravia	Welche ökologischen Herausforderungen bezogen auf Wasser bringt der Ausbau von Elektrolysekapazität in Marokko und Deutschland bis 2050?	Stipendium des Promotionskollegs „Klima, Ressourcen und Circular Economy – Wechselbeziehungen, Synergien und Tradeoffs“ (KLIREC), Land Baden-Württemberg im Rahmen der Landesgraduierföderung
	Nurul Himma Michael Wagner Florenca Saravia	Membrane distillation for the process train of water electrolysis	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (MWK), Promotionsstipendien der Landesgraduierföderung (LGF); KIT
	Yair Morales Florenca Saravia	Transferwind-H <sub>2</sub> Mare – Forschungs-Transfer, Technologieplattform H <sub>2</sub> Mare (Verbundvorhaben)*	BMFTR
	Alina Schlosser Florenca Saravia	Thermlon: Extraktion von Lithium aus thermalen Solen (Verbundvorhaben)	Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWE)
	Jan Singer Yair Morales Florenca 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> ) (Verbundvorhaben)*	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
	Jan Singer Yair Morales Florenca Saravia	H <sub>2</sub> ZVK – Integrale H <sub>2</sub> -Machbarkeitsstudie am Standort Klärwerk Steinhäule*	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
	Sophie Oeppling Florenca Saravia	Untersuchungen zum Schutz des Untergrundes vor modifizierten Geothermalfliiden (SCHUTZGRUND) – Vorhaben: Einfluss der Wertstoffextraktion auf die Zusammensetzung von geothermalen Fluiden	BMFTR
Biologische Abwasserreinigung	Andreas Netsch Michael Wagner	Entwicklung und Demonstration einer energieeffizienten bioelektrochemischen Abwasserbehandlung im technischen Maßstab mit Einhaltung gesetzlicher Anforderungen zur Ablaufqualität (Demo-BioBZ; Verbundprojekt)*	BMFTR
Biologische Grenzflächen	Süheyla Duran Andrea Hille-Reichel	Anwendung von Membranbiofilmreaktoren für die biologische Methanisierung und für die autotrophe Denitrifikation	The Republic of Türkiye Ministry of National Education, KIT
	Andreas Netsch Andrea Hille-Reichel	Skalierbarkeit der biologischen Biogasaufbereitung mit Membranbiofilmreaktoren – MBfR-Skal (Projektphase 2)	MWK
	Maximilian Miehle Andrea Hille-Reichel	Skalierbarkeit von Gasfermentationsprozessen in Membranbiofilmreaktoren* (Projektphase 1)	MWK
	Max Rümenapf Andrea Hille-Reichel	Etablierung eines kohlenstoffdioxid- und glukose-basierten Verfahrens zur Herstellung von 2,3-Butandiol mithilfe eines membrangebundenen Biofilms aus zwei bakteriellen Spezies	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
	Zhizhao Xiao Andrea Hille-Reichel	Skalierbarkeit mikrobieller (Einkammer-) Elektrolysezellen für die Nutzung von Abfallstoffströmen	KIT

Biologische Grenzflächen bearbeiteten Projekte sind in **Tabelle 3.1** aufgeführt.

Im Folgenden werden zwei Projekte ausführlicher vorgestellt.

Anwendung der Computational Fluid Dynamics-Simulation zur Identifizierung der Hydrodynamik in einem bioelektrochemischen Scheibentauchkörperreaktor (RDBER, rotating disc bioelectrochemical reactor)

Zhizhao Xiao, Andrea Hille-Reichel

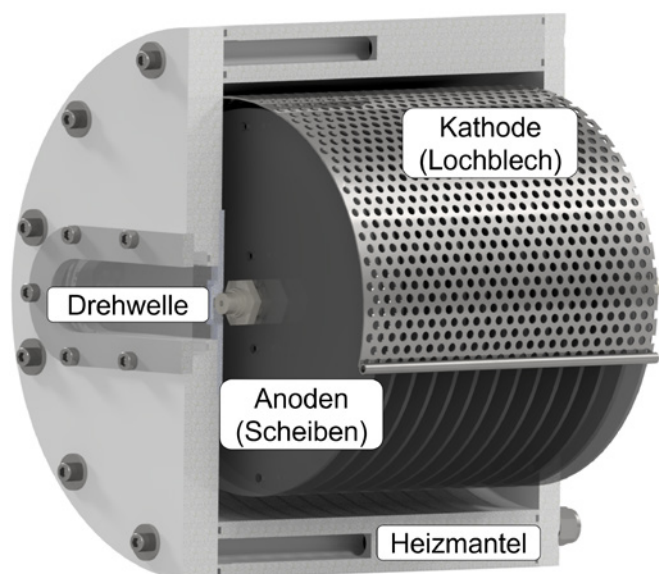
Förderung: Karlsruher Institut für Technologie, Land Baden-Württemberg

Der neuartige RDBER wurde am Engler-Bunte-Institut entwickelt und gebaut [1]. Das Konzept basiert auf dem rotierenden biologischen Scheibentauchkörperreaktor, der in kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen eingesetzt wird und eine große Oberfläche für das Biofilmwachstum bereitstellt, während die Rotation die wechselnde Versorgung mit Sauerstoff bzw. organischen Schmutzstoffen ermöglicht. Zunächst wurde der Reaktor als teilgetauchter, kathodischer Kontaktapparat zur Herstellung von Biokunststoffen aus Rauchgas eingesetzt (BioElectroPlast). Anschließend wurde er zu einer vollständig getauchten anodischen mikrobiellen Elektrolysezelle weiterentwickelt, um im Projekt BROWSE Wasserstoff aus dunkelfermentierten Lebensmittelabfällen zu erzeugen. Das hohe Anodenoberfläche-zu-Volumen-Verhältnis von  $100 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  ermöglicht das Erreichen einer hohen volumetrischen Stromdichte von bis zu  $200 \text{ A m}^{-2}$ , damit gehört der 10-L-RDBER zu den leistungsstärksten Systemen im Vergleich mit anderen Skalierungsversuchen von mikrobiellen Elektrolysezellen von  $\geq 10$ -L Volumen [2]. Dennoch wurden Einschränkungen in der Biofilmverteilung sowohl entlang des Scheibenradius als auch entlang der Drehwelle beobachtet,

die vermutlich auf suboptimale hydrodynamische Bedingungen innerhalb der Reaktorkammer zurückzuführen sind. Zur Untersuchung dieser Phänomene wurde ein dreidimensionales Modell unter Verwendung des Multiple Reference Frame-Ansatzes in Ansys Fluent simuliert.

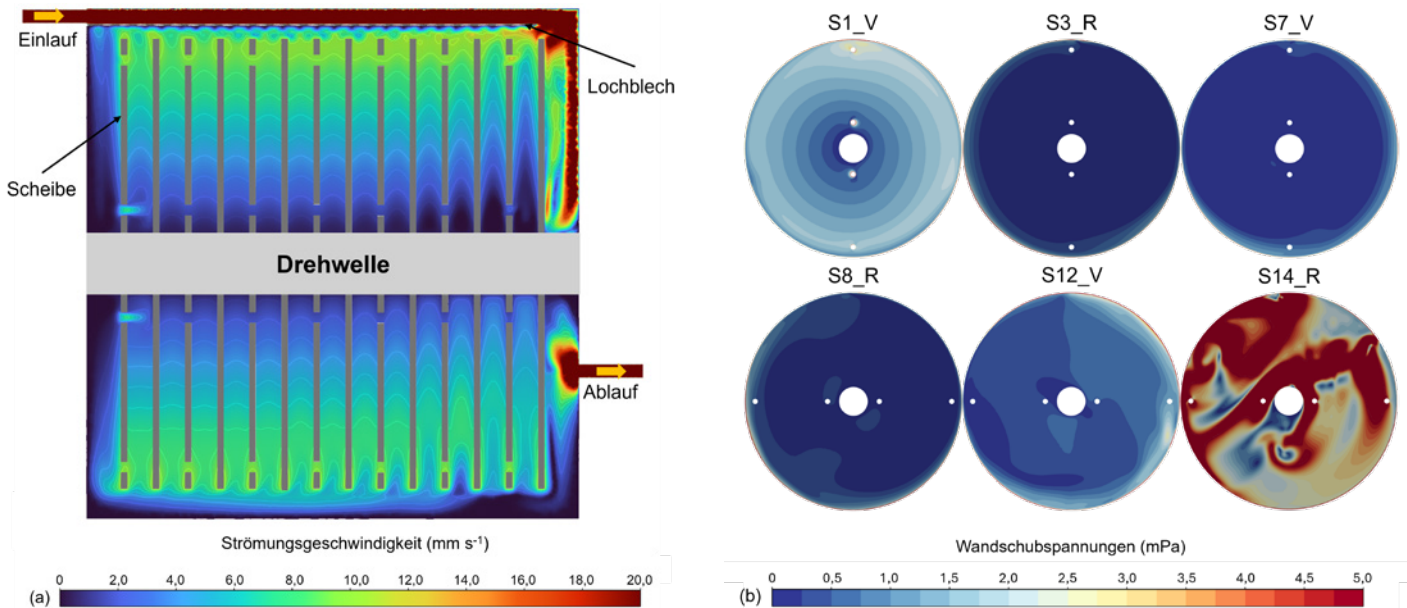
Die Kathode ist in dieser Reaktorkonfiguration als gebogenes Lochblech ausgebildet, das die 14 Anodenscheiben in der oberen Reaktorhälfte umschließt (**Bild 3.1**). Wie in **Bild 3 (a)** gezeigt, bildet die einströmende Flüssigkeit bei einer Rezirkulationsrate von  $500 \text{ mL min}^{-1}$  eine Jet-Strömung oberhalb der Kathode aus und wird überwiegend in den Bereich zwischen der letzten rotierenden Scheibe und dem Auslass geleitet. Innerhalb der rotierenden Domäne wird das Strömungsfeld maßgeblich durch die Scheibenrotation bestimmt. Bei einer Drehzahl von 1 rpm ergibt sich am Scheibenrand eine tangentielle Geschwindigkeit von etwa  $11 \text{ mm s}^{-1}$ . Die Strömung in den Spalten zwischen den Anoden ist vergleichsweise schwach ausgeprägt, was auf eine geringe Wechselwirkung mit der Hauptströmung hindeutet. Infolgedessen ist der konvektive Stofftransport aus der Bulkphase in diese Spaltbereiche eingeschränkt, was im Betrieb zu Limitierungen in der Substratversorgung und im Abtransport von Produkten führen kann. Ebenso ist die Wandschubspannung ein wichtiger hydrodynamischer Parameter, der die Biofilmentwicklung sowie die Zusammensetzung mikrobieller Gemeinschaften beeinflusst [3]. **Bild 3.2 (b)** zeigt die Verteilung der Wandschubspannung (mPa) auf ausgewählten Anodenoberflächen. Erhöhte Wandschubspannungen von  $\geq 5 \text{ mPa}$  treten wie erwartet auf der letzten rotierenden Scheibe auf, was auf die Jet-Strömung im Auslassbereich zurückzuführen ist. Die erste Anode weist moderate Wandschubspannungen auf, während die dazwischenliegenden Scheiben vergleichsweise geringen Schubspannungen ausgesetzt sind.

Maßnahmen wie beispielsweise eine Verlagerung des Zulaufs und/oder eine Verringerung der Packungsdichte der Scheiben könnten die Hydrodynamik im Reaktor verbessern. Derzeit werden konstruktive Anpassungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse umgesetzt.



**Bild 3.1:** Reaktorkonfiguration des 10-L-RDBER.

- [51] 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* 2023, 21, 101357. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101357
- [52] Xiao, Z.; Rügenapf, M.; Hackbarth, M.; Hille-Reichel, A.; Horn, H.; Reiner, J. E.: Impact of the rotational speed and counter electrode configuration on the performance of a rotating disc bioelectrochemical reactor (RDBER) operated as microbial electrolysis cell. *Bioresource Technology Reports* 2025, 31, 102208. DOI: 10.1016/j.biteb.2025.102208
- [53] Godain, A.; Vogel, T. M.; Fongarland, P.; Haddour, N.: Influence of hydrodynamic forces on electroactive bacterial adhesion in microbial fuel cell anodes. *Bioengineering* 2023, 10 (12), 1380. DOI: 10.3390/bioengineering10121380



**Bild 3.2:** (a) Konturen der Strömungsgeschwindigkeit im mittleren vertikalen Querschnitt des 10-L-RDBER. (b) Verteilung der Wandschubspannung auf ausgewählten Scheibenoberflächen (S1: Scheibe 1; V: Vorderseite in Strömungsrichtung; R: Rückseite).

### Fischer-Tropsch-Abwasser: Behandlung mittels anaerobem Membranbioreaktor

Ben Schädlich, Yair Morales, Florencia Saravia

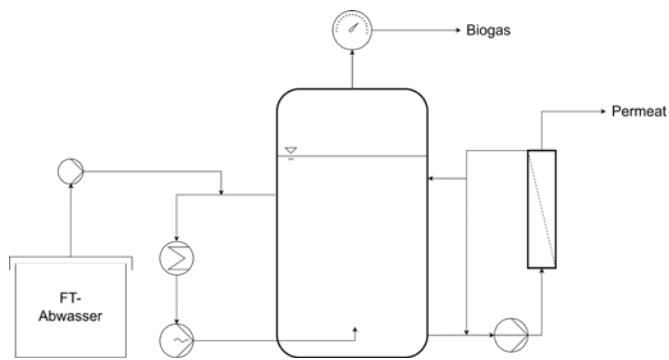
#### Förderung: Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen des H<sub>2</sub>MARE Projekts PtX-Wind

Zu den zentralen Technologien von Power-to-X zählt die Fischer-Tropsch-Synthese (FT), bei der Wasserstoff gemeinsam mit CO<sub>2</sub> oder CO in langkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt wird. Diese dienen als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Diesel oder Kerosin. Bei der FT-Reaktion entsteht pro kg produziertem Kohlenwasserstoff etwa 1,3 kg Abwasser, welches durch polare, sauerstoffhaltige Nebenprodukte stark organisch belastet ist. Angesichts des hohen chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) von etwa 30 g/L erscheint ein anaerobes biologisches Behandlungsverfahren vielversprechend und ermöglicht zudem die Rückgewinnung des organischen Kohlenstoffs in Form von Biogas. Anaerobe Membranbioreaktoren (AnMBR) bieten darüber hinaus den Vorteil, dass die hydraulische Aufenthaltszeit (HRT) vom Schlammalter entkoppelt wird, wodurch kurze Verweilzeiten bei partikelfreiem Ablauf realisiert werden können. Die Eignung anaerober Verfahren für FT-Abwasser konnte in Studien bereits gezeigt werden, allerdings beschränken sich diese Studien überwiegend auf wenige reale FT-Abwässer und Versuchsaufbauten im Labormaßstab [4-6]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Behandlung von realem FT-Abwasser aus einer großtechnischen Demonstrationsanlage mit einem 100-Liter AnMBR unter-

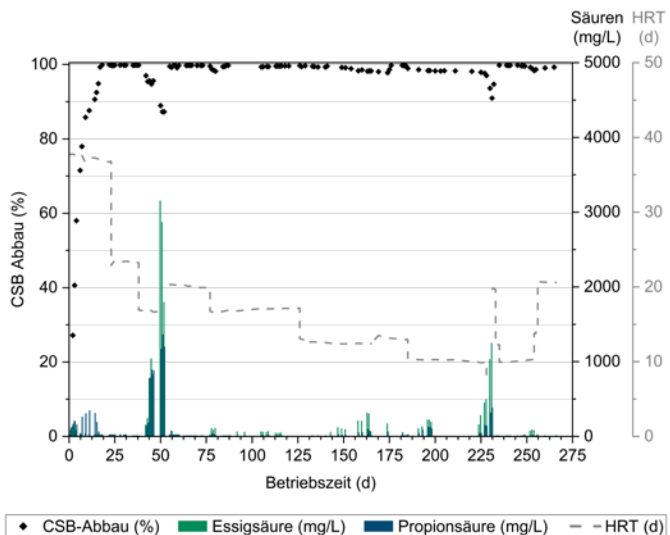
sucht. Ziel der Arbeit war es, in einem kontinuierlichen Langzeitversuch den CSB-Abbau, die Prozessstabilität sowie die Belastungsgrenzen des Systems zu erfassen und somit eine praxisrelevante Grundlage für die Bewertung der Verfahrenseignung als Basis für nachfolgende Optimierungsstrategien zu bilden.

Das FT-Abwasser wies einen CSB von  $32 \pm 2$  g/L auf, wobei etwa 98 % auf kurzkettenige Alkohole und 2 % auf organische Säuren entfielen. Aufgrund der geringen elektrischen Leitfähigkeit ( $210 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) wurde ab Tag 50 eine Nährstofflösung im Verhältnis CSB:N:P = 800:5:1 zudosiert. Auf eine Neutralisation des sauren Abwassers (pH 3,1) wurde verzichtet, um intrinsische Prozessgrenzen zu erfassen. Der AnMBR, siehe Bild 3.3, wurde mit einem Arbeitsvolumen von 100 L betrieben und kontinuierlich beschickt. Eine Rezirkulation gewährleistete Durchmischung und Temperaturkontrolle bei 32 °C. Die Membranfiltration erfolgte im Überströmungsbetrieb (Ultrafiltration, 0,012 m<sup>2</sup>, 30 nm, 4 m/s).

Nach Animpfen mit Faulschlamm wurde der Reaktor zunächst bei niedriger organischer Raumbelastung (0,8 gCSB/(L·d)) und langer HRT (37 d) betrieben und anschließend schrittweise bis zum Belastungslimit gesteigert. Die Prozessüberwachung umfasste CSB, organische Säuren, Biogasproduktion und pH-Wert. Zusätzlich wurden Flux und Transmembrandruck kontinuierlich erfasst sowie die Biogaszusammensetzung stichprobenartig analysiert. Nach einer Anlaufphase von 17 Tagen wurden stabile CSB-Abbaugrade von über 98,5 % erreicht, die über weite Strecken der Versuchszeit konstant blieben. Instabile Betriebsphasen infolge von Überlastung waren durch eine Akkumulation von Essig- und Propionsäure gekennzeichnet,



**Bild 3.3:** Schematische Darstellung des eingesetzten anaeroben Membranbioreaktors (AnMBR) zur Behandlung von Fischer-Tropsch-Abwasser. Das System umfasst einen Reaktor mit externer Rezirkulation, eine Membranstufe zur Fest-Flüssig-Trennung sowie die zugehörige Peripherie zur Beschickung, Durchmischung und Prozesssteuerung.



**Bild 3.4:** Verlauf des CSB-Abbaus, der Konzentrationen organischer Säuren (Essigsäure und Propionsäure) sowie der hydraulischen Aufenthaltszeit (HRT) über die Betriebszeit des AnMBR. Überlastungsphasen sind durch eine Akkumulation organischer Säuren und einen temporären Rückgang des CSB-Abbaus gekennzeichnet, während stabile Betriebsphasen durch nahezu vollständigen CSB-Abbau (> 98 %) bei geringen Säurekonzentrationen charakterisiert sind.

wie in **Bild 3.4** dargestellt ist, die zu einer Hemmung der Methanogenese führten. In diesen Phasen wurde die Beschickung temporär unterbrochen, bis sich das System erholte. Nach etwa 50 Tagen wurde eine Nährstofflimitierung festgestellt, weshalb anschließend eine Nährstofflösung zudosiert wurde, wodurch eine weitere Steigerung der organischen Belastung möglich war. Nach insgesamt 190 Tagen wurde ein Belastungslimit bei einer Raumbelastung von 3,4 gCSB/(L·d) und einer HRT von zehn Tagen identifiziert. Der spezifische Methanertrag lag mit 0,32 NL/g CSB nahe am theoretischen

Maximum, was auf eine weitgehend vollständige Umwandlung des organischen Kohlenstoffs sowie eine effiziente methanogene Aktivität hinweist.

Während der 275-tägigen Betriebszeit nahm der Flux von 120 auf 75 LMH ab. Eine Reinigung führte zwar kurzfristig zu einer Wiederherstellung des Fluxes, jedoch stellte sich innerhalb weniger Minuten wieder der ursprüngliche Betriebszustand ein. Dies deutet darauf hin, dass permanentes Fouling eine untergeordnete Rolle spielt und vielmehr Veränderungen der Schlammeigenschaften die Filtrationsleistung maßgeblich beeinflussen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die anaerobe Behandlung von Fischer-Tropsch-Abwasser mittels AnMBR mit CSB-Abbaugraden von über 98,5 % technisch gut realisierbar ist. Für eine weitere Leistungssteigerung besteht Optimierungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Nährstoffdosierung und einer Vorkonditionierung des Abwassers. Zukünftige Arbeiten sollten daher auf die Verbesserung der Betriebsbedingungen sowie auf geeignete Nachbehandlungsschritte zur Reduktion der Restbelastung abzielen.

[54] van Zyl, P.J. Anaerobic digestion of Fischer-Tropsch reaction water: Submerged Membrane Anaerobic Reactor Design, Performance Evaluation & Modeling. PhD Thesis, Cape Town, 2008

[55] Majone, M.; Aulenta, F.; Dionisi, D.; D’Addario, E.N.; Sbardellati, R.; Bolzonella, D.; Beccari, M. High-rate anaerobic treatment of Fischer-Tropsch wastewater in a packed-bed biofilm reactor. *Water Research* 2010, 44, 2745–2752. DOI: 10.1016/j.watres.2010.02.008

[56] Wang, D.; Ma, W.; Han, H.; Li, K.; Xu, H.; Fang, F.; Hou, B.; Jia, S. Enhanced anaerobic degradation of Fischer-Tropsch wastewater by integrated UASB system with Fe-C micro-electrolysis assisted. *Chemosphere* 2016, 164, 14–24. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.074

### 3.3. Veröffentlichungen

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

[57] Himma, N. F.; Wagner, M.; Horn, H.; Saravia, F.: In-situ monitoring and understanding of wetting in membrane distillation by means of optical coherence tomography. *Separation and Purification Technology* 2025, 371, 133203. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.133203

[58] Netsch, A.; Latussek, I.; Horn, H.; Wagner, M.: Detecting excess biofilm thickness in microbial electrolysis cells by real-time in-situ biofilm monitoring. *Biotechnology and Bioengineering* 2025, 122 (8), 2049–2062. DOI: 10.1002/bit.29017

[59] Aliaskari, M.; Horn, H.; Saravia, F.: Real time monitoring of scaling behavior in bipolar membrane electro dialysis. *Journal of Membrane Science* 2025, 727, 124063. DOI: 10.1016/j.memsci.2025.124063

[60] Zhang, C.; Li, Y.; Zhu, J.; Zhang, Z.; Xie, Y.; Fu, S.; Zheng, W.; Shen, Z.; Ren, B.; Chen, Z.; He, H.; Ying, G.-G.; Horn, H.; McKenna, A. M.; Huang, M.: Salinity stress modulates the dynamic co-occurrence interactions between DOM and microbial community profiles in a typical river–estuary–ocean continuum: From the Pearl River to South China Sea. *ACS ES&T Water* 2025, 5 (5), 2096–2109. DOI: 10.1021/acsestwater.4c00832

[61] Tosun, J.; Debus, M.; Schaub, S.; Klein, S.; Scherer, U.; Goeschl, T.; Horn, H.: Tap water consumption choices in out-of-home set-

- tings: insights from a survey of German adults. *International Journal of Water Resources Development* 2025, 41 (3), 647–666. DOI: 10.1080/07900627.2024.2423742
- [62] Kontschak, L.; Gruschke, O.; Trapp, L.; Baser, H. N.; MacKinnon, N.; Rychen, P.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: MRI on ion exchange resins at different length scales. *AIChE Journal* 2025, 71 (4), Art.-Nr.: 18659. DOI: 10.1002/aic.18659
- [63] Rominger, L.; Hackbarth, M.; Jung, T.; Scherzinger, M.; Rosa, L. F. M.; Horn, H.; Kaltschmitt, M.; Picioreanu, C.; Gescher, J.: Efficiency and process development for microbial biomass production using oxic bioelectrosynthesis. *Trends in Biotechnology* 2025, 43 (3), 673–695. DOI: 10.1016/j.tibtech.2024.11.005
- [64] Xiao, K.; Horn, H.; Abbt-Braun, G.: A review on the recovery of humic substances from anaerobic digestate of sludge as a potential fertilizer: Quantification, efficiency and interaction with pollutants. *Environmental Research* 2025, 267, 120710. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120710
- [65] Wittig, C.; Wagner, M.; Vallon, R.; Crouzier, T.; van der Wijngaart, W.; Horn, H.; Bagheri, S.: The role of fluid friction in streamer formation and biofilm growth. *npj Biofilms and Microbiomes* 2025, 11 (1), Art.-Nr.: 17. DOI: 10.1038/s41522-024-00633-2
- [66] Schmid, E.; Lerner, R.; Rudszuck, T.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Inline monitoring of lithium brines with low-field NMR. *Applied Sciences* 2025, 15 (18), Art.-Nr.: 9987. DOI: 10.3390/app15189987
- [67] Zhu, C. et al.: Global diversity and distribution of antibiotic resistance genes in human wastewater treatment systems. *Nature Communications* 2025, 16 (1), 4006. DOI: 10.1038/s41467-025-59019-3
- [68] Netsch, A.; Sen, S.; Horn, H.; Wagner, M.: In situ biofilm monitoring using a heat transfer sensor: The impact of flow velocity in a pipe and planar system. *Biosensors* 2025, 15 (2), Art.-Nr.: 93. DOI: 10.3390/bios15020093
- [69] Bucş, S.; Jung, O.; Wagner, M.; Saravia, F.; Horn, H.; Picioreanu, C.: Raman micro-spectroscopy for the study of concentration polarization in the presence of biofouling in pressure driven membrane systems. *Journal of Membrane Science* 2025, 713, 123219. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.123219
- [70] Shylaja Prakash, N.; Maurer, P.; Horn, H.; Saravia, F.; Hille-Reichel, A.: Separation of short-chain fatty acids from primary sludge into a particle-free permeate by coupling chamber filter-press and cross-flow microfiltration: Optimization, semi-continuous operation, and evaluation. *Membranes* 2025, 15 (1), Art.-Nr.: 22. DOI: 10.3390/membranes15010022
- [71] Shylaja Prakash, N.; Neske, W.; Rügenapf, M.; Xiao, Z.; Netsch, A.; Horn, H.; Ullmann, J.; Reiner, J.E.; Hille-Reichel, A.: Evaluation of key operational parameters in a novel pilot-scale rotating disk bioelectrochemical reactor for hydrogen production in a wastewater biorefinery. *Chemical Engineering Journal* 2025, 525, 168691. DOI: 10.1016/j.cej.2025.168691
- [72] Beratto-Ramos, A.; Jaramillo, K.; Zapata, P.; Romero, J.; Martínez, J.; Meléndrez, M. F.; Saravia, F.; Horn, H.; Borquez, R.; Pino-Soto, L.: Characterization and evaluation of the recovery process of saturated reverse osmosis membranes by chemical oxidation. *Desalination* 2025, 594, Art.-Nr.: 118273. DOI: 10.1016/j.desal.2024.118273

## 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. 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/>



**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>



**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>



**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. Frederik Scheiff**  
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
Karlsruhe  
Tel.: 0721 608-44818  
Frederik.scheiff@kit.edu  
<https://ceb.ebi.kit.edu/>