

Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2024

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

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



Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2024, Teil 1

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

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

Forschung und Lehre, Tätigkeitsbericht, Ausbildung

Dieser jährlich erscheinende Bericht gibt einen Überblick über die Entwicklungen und Aktivitäten am Engler-Bunte-Institut, der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT sowie der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Im Fokus dieses Berichts steht die Entwicklung der drei Institutsteile – Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie, EBI ceb, Verbrennungstechnik, EBI vbt, und Wasserchemie und Wassertechnologie, EBI WCT – mit Beiträgen aus der universitären Lehre, der Aus- und Weiterbildung, den Forschungs- und Entwicklungsprojekten, der Beratung und Firmenkontakte. Wie auch in den vergangenen Jahren erscheinen die gasspezifischen Beiträge im gwf Gas + Energie (Teil 1: Ausgabe 6/2025, EBI ceb; Teil 2: Ausgabe 7-8/2025, EBI vbt) und der wasserspezifische Beitrag im gwf-Wasser | Abwasser (Teil 3: Ausgabe 6/2025, 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).

Das KIT, als „Die Forschungsuniversität 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 Fragen aus Gesellschaft, Wissenschaft

und Wirtschaft. Ein besonderer Fokus liegt auf der Energiewende und dem Umbau des Energiesystems in Deutschland, 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 sowie die DVGW-Forschungsstelle am EBI sind in den Themenfeldern Energie und Umwelt tätig und haben im Jahr 2024 zahlreiche neue Projekte akquiriert. Besondere Aufmerksamkeit gilt der zukünftigen Herstellung und Nutzung von Wasserstoff, die vor allem an der DVGW-Forschungsstelle im Bereich Gastechologie und im Prüflaboratorium Gas bearbeitet wird. Die Finanzierung der Forschung erfolgt sowohl durch die öffentliche Hand als auch durch Aufträge aus der Industrie. Die Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts (GdF) ist für die Institute ein wichtiger Partner und unterstützt die Forschung am EBI großzügig und zuverlässig.

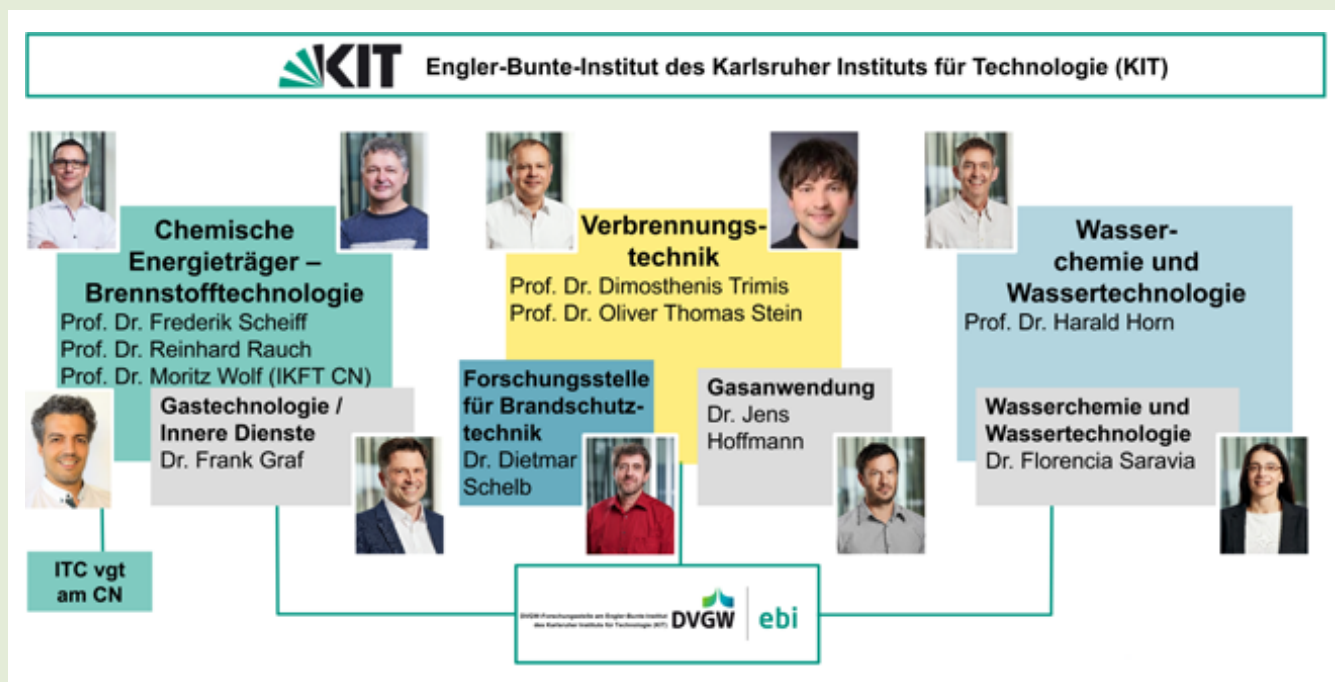


Bild 0.1: Aktuelle Organisationsstruktur des Engler-Bunte-Instituts und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut

Zum 1. Oktober wurde Prof. Frederik Scheiff in der Nachfolge von Prof. Thomas Kolb auf die Professur „Verfahrenstechnik chemischer Energieträger und Rohstoffe“ und die Leitung des Institutsteils EBI ceb berufen. Damit übernimmt Prof. Scheiff auch die Leitung des Bereichs Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle und der Abteilung Vergasungstechnologie am Institut für Technische Chemie am Campus Nord. Detailliert wird zur Übernahme der Leitung im Beitrag des Institutsteils Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie eingegangen.

Lehre und Ausbildung

Auch in der Lehre ist das EBI aktiv und bietet Studiengänge in Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik sowie Bioingenieurwesen an. Im Wintersemester 2024/25 wurden 114 Bachelor- und 87 Masterstudierende im Chemieingenieurwesen sowie 50 Bachelor- und 17 Masterstudierende im Bioingenieurwesen begrüßt. Der englischsprachige Master-Studien-

gang „Water Science and Engineering“ verzeichnet eine stetig steigende Nachfrage, wobei zehn Studierende im ersten Fachsemester immatrikuliert wurden.

Die herausragenden Leistungen der Studierenden werden durch Preise der GdF gewürdigt. Im Jahr 2024 erhielten zwei Masterstudierende den Preis für die beste Masterarbeit: Max Deutschmann für seine Arbeit zum Thema „Simulation eines innovativen Verfahrens zur Verwendung von Ammoniak als Energieträger“ und Jonas Ullmann für seine Arbeit zur „Aufbereitung von Grundwässern mit Aktivkohlefiltration“. Letzterer wurde zusätzlich mit dem Studienpreis Wasser des DVGW ausgezeichnet.

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 Brennstoffumwandlung und -aufbereitung.

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

Im Rahmen der im Jahr 2022 am EBI ceb neu geschaffenen Tenure-Track-Professur für Katalysatormaterialien für die Energiewende, befasst sich Prof. Moritz Wolf mit Katalysatormaterialien und Prozessentwicklung. Die grundlagenorientierten F&E-Arbeiten am EBI ceb werden ergänzt durch die Arbeiten zur Flugstromvergasung der Abteilung Vergasungstechnologie, ITC vgt, am Institut für Technische Chemie, Campus Nord. Durch die enge Verbindung zwischen EBI ceb und ITC vgt werden die anwendungsnahen Forschungseinrichtungen des Campus Nord auch für die Ausbildung der Studierenden genutzt.

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

Bearbeitung von Forschungsthemen von den Grundlagen bis zur technischen Anwendung.

In der Lehre vertritt EBI ceb das Vertiefungsfach „Chemische Energieträger - Brennstofftechnologie“ des Masterstudiengangs der KIT-Fakultät Chemieingenieurwesen/Verfahrenstechnik, ciw/vt. Die Vorlesungen „Grundlagen der Brennstofftechnik“, „Energieträger aus Biomasse“, „Raffinerietechnik“, „Katalytische Verfahren der Gastechnik“, „Wirbelschichttechnik“, „Catalysts for the Energy Transition“ und „Chemical Hydrogen Storage“ werden von den Lehrenden des EBI ceb angeboten. Die Vorlesungen im Vertiefungsfach werden ergänzt durch Vorlesungen des Institutsteils Verbrennungstechnik, EBI vbt und Vorlesungen anderer Institute des KIT.

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

Die Vorlesung „Organisch-chemische Prozesskunde“ im Bachelor-Studiengang sowie diverse Praktika und Exkursionen für die Studienrichtungen Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen ergänzen das Lehrangebot des EBI ceb. In Kooperation mit EBI vbt ist EBI ceb verantwortlich für die Vorlesung „Energieverfahrenstechnik“ und das Profilmfach „Ener-



Bild 1.1: Prof. Kolb übergibt symbolisch den Schlüssel zum Institutsteil EBI ceb an Prof. Scheiff



Bild 1.2: Drei Generationen des Leitungsteams EBI ceb – Dr. Bajohr, Profs. Reimert, Kolb, Scheiff, Dr. Graf (v.li.n.re.)



Bild 1.3: Hans-Rumpf-Studienpreis für den besten Bachelor-Abschluss an Jannis Kümmerle, Übergabe durch Profs. Sabine Enders und Achim Dittler



Bild 1.4: Preis für studentisches Engagement an Anna Rieck (Mitte)

gie- 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.

1.2 Wichtige Ereignisse in 2024

Neue Professur / Nachfolge Prof. Kolb – Offizielle Schlüsselübergabe am 1. Oktober 2024

Zum 1. Oktober wurde Prof. Frederik Scheiff in der Nachfolge von Prof. Thomas Kolb auf die Professur „Verfahrenstechnik chemischer Energieträger und Rohstoffe“ und die Leitung des Institutsteils EBI ceb berufen. Damit übernimmt Prof. Scheiff auch die Leitung des Bereichs Gastechologie der DVGW-Forschungsstelle und der Abteilung Vergasungstechnologie am Institut für Technische Chemie am Campus Nord. Prof. Scheiff bringt langjährige Berufserfahrungen aus der BASF, unter anderem aus der Forschung im Bereich Hochtemperaturreaktionen sowie aus der Zeit in der Betriebsleitung einer Prozesskatalysatorfabrik, mit. Mit der symbolischen Schlüsselübergabe (**Bild 1.1**) wurde der Wechsel in feierlichem Rahmen mit allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des EBI ceb und DVGW gt vollzogen. Der Institutsteil wird weiterhin unter der Bezeichnung „Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie“, EBI ceb, firmieren, zu denen die Professuren Scheiff (Verfahrenstechnik chemischer Rohstoffe und Energieträger, W3) und Rauch (Chemische Konversion Erneuerbarer Energien, W3) zählen, und dem die Tenure-track Professur Wolf (Katalysatormaterialien für die Energiewende) zugeordnet ist (**Bild 1.2**).

Preise / Auszeichnungen

Anlässlich der Graduiertenfeier der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik am 5. Juli 2024 wurde Herr Jannis Kümmerle mit dem Hans-Rumpf-Preis der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik ausgezeichnet. Dieser Preis wird nicht nur für die Abschlussarbeit, sondern für die gesamte Studienleistung vergeben (**Bild 1.3**).

Mit dem Preis der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik für studentisches Engagement wird darüber hinaus eine besondere Anerkennung an Studierende ausgesprochen, die sich jedes Jahr mit großem Engagement und Leidenschaft ehrenamtlich in der Fachschaft, für die Studierenden und in den Gremien der Fakultät einsetzen. Dieser Preis der KIT-Fakultät Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik für studentisches Engagement ging 2024 an Frau Anna Rieck (**Bild 1.4**).

Internationale Zusammenarbeit

Im Juni 2024 besuchte M.Sc. Alexandra Bakratsa vom Center for Research and Technology Hellas (CERTH), Griechenland die Arbeitsgruppe CKE des EBI ceb. Ziel ihres Aufenthalts als Gastwissenschaftlerin war die Durchführung einer Versuchskampagne an der Fischer-Tropsch-Anlage der Arbeitsgruppe mit einem am CERTH entwickelten Katalysator. Dieser ermöglicht direkte Hydrierung von CO₂ zu langkettigen Kohlenwasserstoffen mit in-situ Hydrocracking zur gewünschten Zielfraktion wie etwa Kerosin. Der Aufenthalt wurde im Rahmen der COST Action „Waste biorefinery technologies for accelerating sustainable energy processes“ (kurz WIRE) finanziert. Aus dem Kontakt und den Erkenntnissen des Aufenthalts sind eine Kooperation und diverse Projektanträge auf EU-Ebene entstanden.

Öffentlichkeitsarbeit

Vortrag ACHEMA 2024

Anlässlich der ACHEMA, der Weltleitmesse für Prozessindustrie, die vom 10. bis zum 14. Juni 2024 in Frankfurt am Main stattfand, hatte die deutsche Gesellschaft für Katalyse (GeCatS) TT-Prof. Dr. Moritz Wolf zu einem Vortrag über die Katalysatorentwicklung für die Fischer-Tropsch-Synthese im Rahmen ihres Vortragsprogramms auf der ACHEMA eingeladen. Prof. Wolfs Vortrag mit dem Titel "Sustainable aviation fuels – Tailored Fischer-Tropsch synthesis through advanced catalyst development" fand bei Messebesuchern sowie Vertretern aus Forschung und insbesondere Industrie regen Anklang.

Die Sendung mit der Maus am EBI „Kraftstoff aus Frittenfett“

Am Sonntag, den 2. Juni 2024 waren Prof. Reinhard Rauch und Jonathan Rummel in der „Sendung mit der Maus“ auf ARD und Kika zu sehen. Das Thema der Sendung war „Kraftstoff aus Frittenfett“, also die Konversion von Altspeiseöl zu Diesel. Gezeigt wird das Sammeln vom Altspeiseöl und die Hydrieranlagen von Neste in Rotterdam. Um das Hydrieren im Detail zu erklären, wurden die Laboranlagen beim EBI besichtigt und gezeigt, wie das Hydrieren von Altspeiseöl funktioniert. Der Zeitpunkt ist sehr passend, da nun auch in Deutschland HVO an Tankstellen erhältlich ist.

EBI ceb - intern

Wanderseminar

Das Doktoranden-/Wander-Seminar wurde Ende März 2024 traditionell wieder im Naturfreundehaus Rahnenhof im Pfälzer Wald organisiert. In entspannter Atmosphäre und beim Wandern wurden die Promotionsthemen diskutiert und es gab Zeit und Raum für persönliche Gespräche.

EBI ceb Wandertag und Sommerfest, Weihnachtsmarkt

Wie in den Vorjahren trafen sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des EBI ceb und der DVGW-Forschungsstelle im Juli 2024 zu einer Wanderung oberhalb Karlsruhe Wolfartsweiler und feierten im Anschluss daran auf dem Institutsge-lände den Ausklang des sonnigen Sommertags.

An Weihnachten kamen alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und Ehemalige dann ein zweites Mal zu einer gemeinsamen fröhlichen Feier zusammen, die wie üblich von den jüngsten wissenschaftlichen Mitarbeitern organisiert und erstmals mit der Ansprache vom neuen „Chef“ eröffnet wurde. Beim Singen von Weihnachtsliedern und kniffligem -quiz verging der Abend wie im Flug.

1.3 Forschungsprojekte im Jahr 2024

Auch im Jahr 2024 wurden am EBI ceb und im Bereich Gas-technologie der DVGW-Forschungsstelle wichtige For-

schungsprojekte aus dem Umfeld der Energiewende und der Gaswirtschaft durchgeführt. Besonders hervorzuheben sind dabei folgende Projekte:

1. **InnoSyn (BMBF):** Im Projekt „InnoSyn (Innovative Synthesen flüssiger Energieträger in lastflexiblen Blasensäulen)“ wurden die Arbeiten 2024 beendet. In der Gruppe von Prof. Rauch wurden die experimentellen Versuche zur direkten CO₂-Fischer-Tropsch-Synthese erfolgreich abgeschlossen. Die Gruppe von Dr. Bajohr untersuchte weiterhin die Transfer-Methanisierung experimentell, wobei der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Hydrierung und Dehydrierung der Flüssigphase inkl. Beschreibung beteiligter Nebenreaktionen lag. Bei DVGW gt liefen neben den experimentellen Arbeiten zur Untersuchung der Fluid-dynamik vor allem Betrachtungen zur technologischen und ökonomischen Umsetzbarkeit.
2. **REF4FU (BMDV):** Die Arbeiten im Vorhaben „Erneuerbare Kraftstoffe aus Grünen Raffinerien der Zukunft“, welches vom IKFT koordiniert wird, wurden 2024 fortgeführt. Die Gruppe von Prof. Rauch beschäftigte sich mit der Hydrierung der Schwerbenzinfraction des Methanol-to-Gasoline-Prozesses. Für eine akkurate Mitteldestillat-Analytik wurde ein zweidimensionales Gaschromatographie-System in Betrieb genommen, wobei der Fokus auf der Methodenoptimierung für eine qualitative und quantitative Stoffgruppenanalyse lag. Ein gekühltes Reaktorkonzept für die Hydrierung wurde entwickelt und anhand von kinetischen Untersuchungen im Labormaßstab simuliert und ausgelegt.
3. **CARE-O-SENE (BMBF):** 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 umweltfreundlichem synthetischem Kerosin als Kraftstoffalternative für den Flugverkehr. Der Beitrag der Arbeitsgruppe von TT-Prof. Dr. Moritz Wolf ist die Entwicklung und Herstellung von Modellkatalysatoren, um mittels fortschrittlicher Charakterisierungstechniken Einblicke in strukturelle Abhängigkeiten und Funktionsprinzipien zu gewinnen.
4. **Sonderforschungsbereich 1441 (DFG):** Das assoziierte Projekt „Inductive heating of catalysts and novel reactor designs“ hatte eine Laufzeit bis Ende 2024 und wird nach der erfolgreichen Beantragung des Sonderforschungsbereichs 1441 für eine zweite Förderperiode nun als Projekt C06N „Dynamische Reaktoren durch Induktionserwärmung von Katalysatoren“ bis 2028 gefördert. Der Sonderforschungsbereich 1441 (<https://www.trackact.kit.edu/>) „Tracking the Active Site in Heterogeneous Catalysis for Emission Control“ wird um die Anwendung elektromagnetischer induktiver Beheizung katalytischer Reaktoren erweitert. Das Teilprojekt erforscht verschiedene Konzepte zur Induktionserwärmung von Katalysatoren für die Emissionskontrolle mit mehreren skalenübergreifenden Ansätzen, welche von Laborreaktoren bis in den Nanometerbereich reichen.

5. H₂-Leitprojekt TransHyDE (BMBF): In dem aus neun Verbünden bestehenden Projekt mit 85 Partnern und einer Gesamtförderung von ca. 140 Mio. € werden verschiedene Transportoptionen für Wasserstoff und dessen Derivate untersucht. In dem von DVGW gt koordinierten Verbund GET H₂ TransHyDE, in dem es um den leitungsgebundenen H₂-Transport geht, wurden 2023 Laboruntersuchungen zur adsorptiven Entfernung von Spurenstoffen aus Wasserstoff durchgeführt und die H₂-Spurenanalytik weiter ausgebaut. Im Verbundprojekt „TransHyDE – Sys“ wurden weiterführende Untersuchungen zum Import von H₂ und H₂-Derivaten durchgeführt und das Thema THG-Wirkung von H₂ adressiert. Außerdem wurden die inhaltlichen Arbeiten im Verbund LNG2Hydrogen begonnen, bei dem die Umrüstung von LNG-Terminals auf Flüssigwasserstoff oder H₂-Derivate im Fokus steht.
6. H₂-Leitprojekt H2Mare (BMBF): In vier Verbundprojekten mit 32 Partnern und einem Fördervolumen von ca. 105 Mio. € untersuchen EBI ceb und DVGW gt gemeinsam die Offshore-Erzeugung von Liquefied Natural Gas (LNG) auf Basis der am Institut entwickelten Waben-Methanisierung. Neben Grundlagenuntersuchungen am Institut und theoretischen Betrachtungen und vergleichenden Bewertungen mit anderen Prozessketten wurde im Jahr 2023 die Errichtung der LNG-Prozesskette im Demomaßstab von der Wasserelektrolyse über die Methanisierung und Gasaufbereitung bis hin zur Verflüssigung am KIT Energy Lab weiter vorangetrieben. Die Planungsarbeiten zur Anpassung und Integration der verschiedenen Systemkomponenten dieser Prozesskette in die Energy Lab Infrastruktur wurden abgeschlossen und mit den Umbauarbeiten begonnen.
7. ENSURE II +III (BMBF): Das Kopernikus-Projekt ENSURE II zu neuen Netzstrukturen wurde 2023 abgeschlossen. DVGW gt hat zusammen mit externen Projektpartnern ein Konzept zur sektorengekoppelten Verschaltung von Energieanlagen und -infrastrukturen entwickelt. Außerdem wurde die dritte Projektphase begonnen, in der DVGW gt neben der Fortführung der Modellierarbeiten zur Sektorenkoppelung auch für das Thema Wasserstoff zuständig ist.

1.4 Abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 2024

Folgende wissenschaftliche/studentische Abschlussarbeiten kamen im Institutsteil EBI ceb im Jahr 2024 zum Abschluss:

Dissertationen

Nach erfolgreicher Forschungsarbeit am EBI ceb und ITC vgt wurden in 2024 folgende Doktoranden promoviert:

- Maximilian Dammann, „Numerical modelling and simulation of atmospheric entrained flow gasification of surrogate fuels“, Referent Prof. Kolb, <https://doi.org/10.5445/IR/1000172116>
- Christian Hotz, „Zweiphasen-Freistrahlmolell eines atmosphärischen Flugstromvergasers“, Referent Prof. Kolb

Masterarbeiten

Ihre Masterarbeit erfolgreich abgeschlossen haben:

- Lea Willmann, „Development and experimental validation of a reactor model of a polytropic profile reactor“, Prof. Kolb
- Anna Linnea Rieck, „Beschreibung der Hydrierung der Flüssigphase als Nebenreaktion bei der Dreiphasen-Methanisierung“, Prof. Kolb
- David Märker, „Investigation of the atomization behavior of Newtonian fluids with different viscosities using sheet nozzles“, Prof. Kolb
- Marius Weiser, „Bestimmung der Temperaturverteilung in technischen Wabenkatalysatoren für die katalytische Methanisierung“, Prof. Kolb
- Hannah Wolf, „Erweiterung der Standardlast-Profile im Stromsektor mit dezentralen Energieanlagen“, Prof. Kolb
- Manuel Nather, „Untersuchung des Zusammenwirkens von Reaktion und Stofftransport in Feststoff-Partikeln aus der Flugstromvergasung von Biomasse“, Prof. Kolb
- Anna Maria Holfelder, „Einfluss von Nebenreaktionen der Flüssigphase auf die Katalysatoraktivität in der Dreiphasen-Methanisierung“, Prof. Kolb
- Natalie Streller, „Bestimmung der Wärmetransporteigenschaften von technischen Wabenkörpern“, Prof. Kolb
- Hannah Lepère, „Untersuchung des Einflusses von Wassersorbens auf die sorptions-gestützte CO₂-Fischer-Tropsch-Synthese im dreiphasigen System“, Prof. Rauch
- Monika Klaus, „Modellierung der Flüssigkeitszirkulation und experimentelle Untersuchung der Partikelzirkulation in einem neuartigen Reaktorkonzept für die sorptions-gestützte Fischer-Tropsch-Synthese“, Prof. Rauch
- Ruslan Ergaliev, „Katalysatorstabilität und -eignung zum Scale-up der dreiphasigen CO₂-Fischer-Tropsch-Synthese“, Prof. Rauch
- Moritz Mößner, „Produktverteilung und thermodynamische Modellierung der dreiphasigen CO₂-Fischer-Tropsch-Synthese“, Prof. Rauch

Bachelorarbeiten

Ihre Bachelorarbeit erfolgreich abgeschlossen haben:

- Moritz Dennig, „Bestimmungen von Gaslöslichkeiten für die Dreiphasen-Methanisierung“, Prof. Kolb
- Kamen Iliev, „Untersuchungen zur homogenen Pyrolyse von Methan in einem Laborreaktor – Inbetriebnahme und erste Ergebnisse“, Prof. Kolb
- Jannik Pfaff, „Methodenentwicklung zur qualitativen und quantitativen Analyse von komplexen Kohlenwasserstoffmischungen mittels zweidimensionaler Gaschromatographie“, Prof. Rauch

1.5 Laufende wissenschaftliche Arbeiten im Jahr 2024

1.5.1 Arbeitsgruppe „Katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung“

Siegfried Bajohr, Rafael Becka, Crispin Deppe, Mathias Held, Sabina Hug, Brahim Jouini, Martin Kansy, Monika Klaus, Benedikt von Lewinski, Simon Sauerscell, Marius Weiser

Methanisierung im Dreiphasen-Reaktor

In 2024 wurde der Umbau der 100 kW Demonstrationsanlage zur Dreiphasen-Methanisierung (3PM) am KIT Energy Lab abgeschlossen, wodurch alternativ zum Methanisierungsbetrieb auch die Option besteht, Gas im geschlossenen Kreislauf durch den Blasensäulenreaktor strömen zu lassen. Angetrieben wird der Gaskreislauf von einem zweistufigen Turbinenverdichter und durch den Umbau besteht jetzt die Möglichkeit, die Bestimmung von Stofftransportkoeffizienten und die Untersuchung der Hydrodynamik in einem breiteren und weit über den für die Dreiphasen-Methanisierung relevanten Parameterbereich vorzunehmen. Mit Hilfe dieser Experimente in einem anwendungsnahen Maßstab können Grundlagenuntersuchungen zur Bestimmung des volumenbezogenen Stoffübergangskoeffizienten $k_L a$ durchgeführt werden, die zur Überprüfung und Verifizierung von Auslegungsmodellen benötigt werden.

Ende 2024 wurden im Rahmen der Inbetriebnahme des Gaskreislaufs erste Tests zur Bestimmung von Stofftransportkoeffizienten durchgeführt. **Bild 1.5** zeigt den zeitlichen Verlauf des Reaktordrucks während einer Messung. Das Messprinzip besteht darin, den Blasensäulenreaktor mit einem Reingas (im Beispiel hier CO_2) stationär zu durchströmen und dann den Druck sprunghaft zu erhöhen. Da sich bei dem höheren Druck mehr Gas in der Flüssigkeit löst als bei dem Anfangsdruck, befindet sich das System nicht mehr im Gleichgewicht. Während der Blasensäulenreaktor weiter mit Gas durchströmt wird, findet der Stofftransport von der Gas- in die Flüssigphase statt. Da der Gaskreislauf ein geschlossenes System ist, sinkt der Druck durch das Lösen des Gases wieder ab. Je größer der Stofftransportkoeffizient ist, desto schneller wird ein stationärer Endwert des Drucks erreicht. Um hieraus den Stofftransportkoeffizienten zu bestimmen, wird der Stofftransport aus dem Gas in die Flüssigphase mit einem Modell beschrieben und das Modell mittels Regression an die experimentellen Ergebnisse angepasst. Der dabei angepasste Parameter ist der Stofftransportkoeffizient, welcher dann nach Minimierung der Abweichungen zwischen Modell und Experiment das Versuchsergebnis darstellt.

Belastbare Messdaten zu Stofftransport und Hydrodynamik bei den Prozessbedingungen der Dreiphasen-Methanisierung sind in der Literatur nicht zu finden, werden aber zur Validierung der Modelle benötigt. Mit dem neuen Aufbau sind Messungen bei Temperaturen bis 330°C und bei Drücken bis 25 bar möglich, was den üblichen Betriebsbereich der 3PM komplett abdeckt und somit eine zuverlässige Validierung der Modellansätze ermöglicht.

Methanisierung im Waben-Reaktor

Im Jahr 2024 wurden die laufenden Arbeiten zur Waben-Methanisierung im Rahmen des BMBF-Projekts H2Mare fortgesetzt. Als Teil des Arbeitspakets „PtX-Wind“, in welchen die Prozessketten von offshore erzeugtem Wasserstoff zu verschiedenen H_2 -Derivaten untersucht werden, entwickelt das EBI ceb ein Konzept zur Erzeugung von regenerativem Methan aus CO_2 und Wasserstoff. Wird dieses verflüssigt, bietet das so gewonnene LNG eine interessante Möglichkeit zur offshore-Speicherung und zum Transport großer Energiemengen über lange Strecken. Die Ziele der H2Mare begleitenden Arbeiten am EBI ceb sind die Entwicklung eines Reaktorkonzepts für Methanisierungsanlagen mit einer Kapazität von 100 MW oder mehr. Zur Effizienzsteigerung der Prozesskette wird aktuell die Beschreibung der Wärme- und Stofftransportvorgänge im Methanisierungsreaktor für eine zuverlässige Modellierung und Auslegung von Reaktoren in dieser Größe fokussiert.

Die Beschreibung des Wärmetransports in realen Wabenkörpern, die als Katalysatorträger in der Waben-Methanisierung genutzt werden, stellt durch die Art der Fertigung, in der wechselnd glatte und gewellte Blechlagen geschichtet und ineinander verdreht werden, eine große Herausforderung dar. Es konnte in jüngsten Arbeiten am EBI ceb gezeigt werden, dass klassische Modelle, welche die einzelnen Wellblechlagen zu gut beschreibbaren Geometrien wie Rechtecke oder Dreiecke vereinfachen, nur bedingt anwendbar sind. Vielmehr ergaben die Modellierungen anhand mit CAD erzeugten Geometrien, dass die lokale Ausrichtung der Wellblechlagen zueinander maßgeblich den Wärmetransport beeinflusst. Es konnten zwei Grenzfälle definiert werden, welche sich anhand der Ausrichtung der Wellblechlagen zueinander auszeichnen. Ein Grenzfall ist die fluchtende Ausrichtung der Blechlagen, diese beschreibt eine Anordnung von Wellbergen über einen steigenden Radius. Dies wirkt sich unvorteilhaft auf den Wärmetransport aus, da zusätzlich der Leitwiderstand in Form der glatten Blechlage, welche auf konstantem Radius vorliegt, überwunden werden muss. Der zweite Grenzfall, die entgegengesetzte Ausrichtung, zeichnet sich dadurch aus, dass ein Blech-Wellental auf einen Wellenberg trifft und dadurch vorteilhaft der Kontaktwiderstand der glatten Blechlage überwunden wird. In **Bild 1.6** dargestellt sind die berechnete effektive radiale Wärmeleitfähigkeit bezogen auf die Feststoffleitfähigkeit anhand eines eigens aufgestellten Einheitszellenmodells für die entgegengesetzte Ausrichtung, einer Simulation zur Validierung dieses Modells und einer in der Literatur vorgeschlagenen Anordnung der Verschaltung der Wärmeleitwiderstände. Das aufgestellte Modell berücksichtigt den durch die Wellenform verlängerten Transportweg in radialer Richtung, wodurch die effektive radiale Wärmeleitfähigkeit niedriger als bei den in der Literatur beschriebenen symmetrischen Modellen ist. Die numerische Überprüfung bestätigt dies nun auch quantitativ.

Im Fall der fluchtenden Ausrichtung ist eine um ca. 30 % niedrigere effektive radiale Wärmeleitfähigkeit zu erwarten.

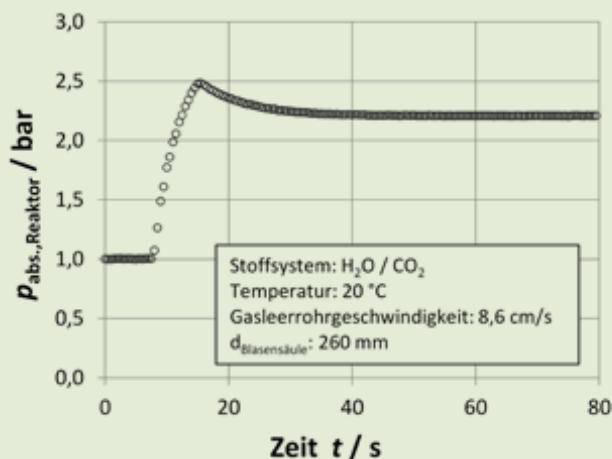


Bild 1.5: Zeitlicher Verlauf des Drucks im Reaktor der Dreiphasen-Methanisierung bei einer exemplarischen Stofftransportmessung

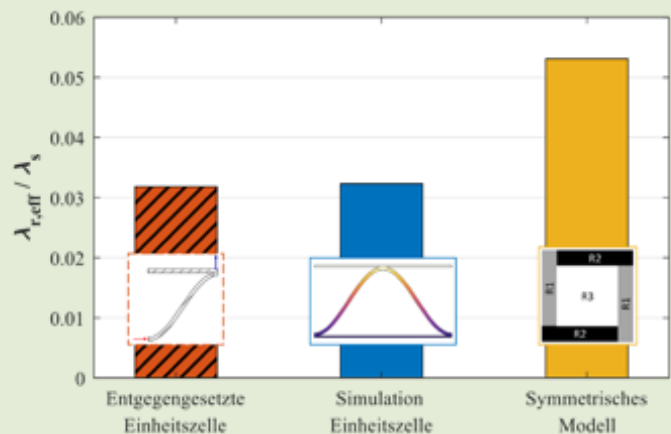


Bild 1.6: Berechnete effektive Wärmeleitfähigkeiten (Modell „Entgegengesetzte Einheitszelle“, Simulation „Entgegengesetzte Einheitszelle“ und Literaturmodell „symmetrisches Modell“ von Visconti et al. (Quelle: [1]))

Weitere numerische Untersuchungen zeigen, dass bei der Vergrößerung des betrachteten Ausschnitts ein Mittelwert aus beiden Grenzfällen zu erwarten ist, da in der realen Wabe eine Verteilung der Ausrichtungen in unterschiedlicher Ausprägung vorliegt. Weitere experimentelle Arbeiten sind mit Hilfe der faseroptischen Temperaturmessung vorgesehen, welche bereits an dieser Stelle im Jahresbericht 2023 vorgestellt wurde. Mit Hilfe dieses Messprinzips können sehr präzise dreidimensionale Temperaturverteilungen in Wabenkörpern mit und ohne Reaktion gemessen werden. Im letzteren Fall wird ein Temperaturprofil aufgeprägt, indem wahlweise heißes oder kaltes Gas durch einen temperierten Wabenkörper strömt. Im Vergleich der Versuchsergebnisse mit einer CFD Simulation des Versuchsaufbaus können detaillierte Aussagen über die Wärmetransporteigenschaften der gesamten Wabe getroffen werden. Die theoretischen und experimentellen Ergebnisse werden derzeit durch die Übertragung in den Technikumsmaßstab am KIT Energy Lab verifiziert. Dort wird in Zusammenarbeit mit dem Bereich Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI die vorhandene Containeranlage zur Waben-Methanisierung an die neuste Generation von katalytischen Wabenkörpern angepasst und in die Gesamtprozesskette aus Methanisierung, Gasaufbereitung und Verflüssigung zu LNG im Demomaßstab, die aktuell aufgebaut wird, integriert.

[1] M. Weiser. Bestimmung der Temperaturverteilung in technischen Wabenkatalysatoren für die katalytische Methanisierung. Masterarbeit (2024).

Methanolsynthese

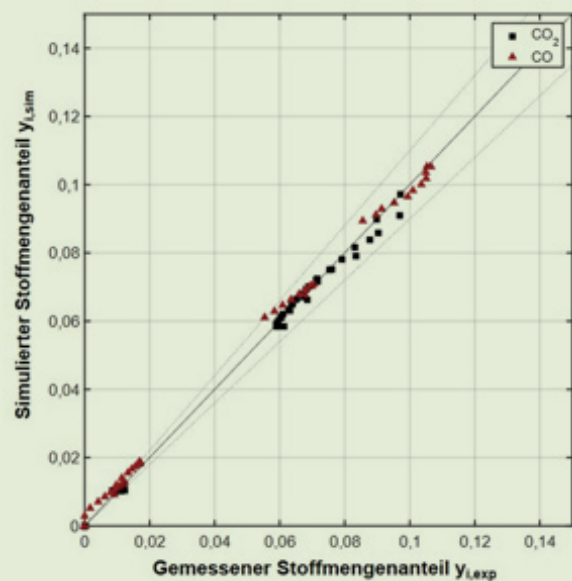
Die wissenschaftlichen Arbeiten zur Reaktionskinetik der CO₂-basierten Methanolsynthese konnten im Jahr 2024

erfolgreich abgeschlossen werden. Hierbei lag der Fokus im ersten Halbjahr 2024 auf der Untersuchung der Entwicklung der Langzeitaktivität des eingesetzten Katalysators in Abhängigkeit von den wesentlichen Betriebsgrößen Wasserstoffanteil, Kohlenstoffdioxidanteil, sowie der Temperatur im Synthesereaktor. Hierzu wurde erfolgreich ein isothermer Betrieb der Methanolsynthese in einem Profilreaktor realisiert. Auf Grundlage der Ergebnisse der Versuchskampagnen zur Langzeitaktivität wurden stabile Betriebsfenster identifiziert und daraus ein Parameterfeld für den Betrieb. Innerhalb dieser stabilen Betriebsfenster konnte im zweiten Halbjahr ein umfassendes mathematisches Modell erstellt werden, das die Reaktionsgeschwindigkeit der Methanolsynthese-Reaktion mit dem verwendeten kommerziellen Katalysator mit guter Genauigkeit wiedergibt.

Unter Zuhilfenahme von Methoden zur statistischen Bewertung von reaktionskinetischen Modellen mit deutlich erhöhter Komplexität konnte nachgewiesen werden, dass die zur Ermittlung des einfachen reaktionskinetischen Modells genutzten orts aufgelösten Konzentrations- und Temperaturprofile bei geringerem Messaufwand zu einer vergleichbaren Genauigkeit führen. Dadurch konnte der Mehrwert des am EBI speziell für die Ermittlung reaktionskinetischer Daten stark exothermer Reaktionen aufgebauten Profilreaktors erfolgreich nachgewiesen werden.

Bild 1.7 zeigt für die Edukt-Moleküle CO und CO₂ einen ersten Vergleich von experimentell bestimmten Stoffmengenanteilen im Profilreaktor mit simulierten Stoffmengenanteilen aus dem abgeleiteten reaktionskinetischen Modell bei gleichen Bedingungen. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und berechneten Stoffmengenanteilen zu erkennen. Für Stoffmengenanteile von 6 % oder

Bild 1.7: Vergleich von experimentell bestimmten Stoffmengenanteilen im Profilreaktor mit simulierten Werten mithilfe des abgeleiteten reaktionskinetischen Modells für die Methanolsynthese.



größer liegt die relative Abweichung zwischen simulierten und berechneten Molanteilen bei unter 5 %, vergleichbar mit gängigen reaktionskinetischen Modellen aus der Literatur. Bei kleineren Stoffmengenanteilen erhöht sich die relative Ungenauigkeit aufgrund eines gleichbleibenden absoluten Messfehlers. Auf Basis der durchgeführten Experimente wird das abgeleitete Modell derzeit verfeinert und die Ergebnisse werden in den nächsten Monaten im Rahmen von mehreren Publikationen und einer Dissertation veröffentlicht.

Methanpyrolyse

Der Fokus der Untersuchungen zur Methanpyrolyse lag im Jahr 2024 auf der Inbetriebnahme der neu im EBI ceb Technikum errichteten Versuchsanlage und ersten Versuchsreihen, mit dem Ziel, reaktionskinetische Daten zur Beschreibung der homogenen Methanpyrolyse zu erhalten. Damit soll eine Methanpyrolysekinetik erarbeitet werden, die nicht von Wandeinflüssen überlagert und damit reaktorgrößenunabhängig für beliebige Skalierung gültig ist. In den ersten Versuchen wurde hierzu ein Oberflächen/Volumen-Verhältnis (SV) von $200 \frac{1}{m}$ eingestellt. Durch Variation des SV ist es möglich, auftretende (katalytische) Wandeffekte zu quantifizieren und somit die rein homogen in der Gasphase ablaufende Methanpyrolyse zu beschreiben. Mit Hilfe der Analyse des Produktgases und durch Bestimmung der Masse an flüssigen und festen Produkten werden Massen- und Stoffstrombilanzen erstellt und aus diesen, reaktionskinetische Daten ermittelt bzw. die Qualität der Versuchsergebnisse beurteilt. Die Massenbilanz für Kohlenstoff und Wasserstoff konnten bis auf wenige Prozent geschlossen werden und bestätigt damit die Qualität des Experiments.

Nach der Inbetriebnahme lag die Bestimmung reaktionskinetischer Daten im Fokus. Dazu wurde der Methanumsatz als zentrale Größe für den Reaktionsfortschritt der Pyrolysereaktionen herangezogen. In **Bild 1.8** ist der Methanumsatz in Abhängigkeit von der Verweilzeit in der isothermen Zone der Versuchsanlage für drei unterschiedliche Temperaturen dargestellt. Wie für eine endotherme Reaktion zu erwarten, steigt der Methanumsatz mit steigender Temperatur an, ebenfalls sollte für eine längere Verweilzeit in der isothermen Zone die Reaktion weiter fortschreiten und der Methanumsatz mit der Verweilzeit stetig zunehmen. Dieses Verhalten konnte im gezeigten Temperaturbereich jedoch nicht durchgehend bestätigt werden. Insbesondere bei Temperaturen von 1.100 °C und 1.200 °C zeigte sich, dass der Methanumsatz nicht kontinuierlich mit steigender Verweilzeit zunimmt.

Bei 1.100 °C konnte ab einer Verweilzeit von $\tau = 3 \text{ s}$ ein Abflachen der Umsatzkurve festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass die Umwandlung von Methan zu Kohlenstoff und Wasserstoff gehemmt wird. Für Temperaturen von 1.200 °C ist diese Hemmung ebenfalls zu beobachten. Hier liegt der Umsatz für 1.200 °C bei $X_{\text{CH}_4} = 92 \text{ %}$ und damit deutlich unter dem thermodynamischen Gleichgewichts-Umsatz von nahezu 100 %. Diese Hemmung kann auf eine Inhibition durch das Reaktionsprodukt Wasserstoff selbst zurückgeführt werden. Je höher die Wasserstoffkonzentration im System ist, desto stärker wird der weitere Reaktionsfortschritt hin zu Wasserstoff und Kohlenstoff gehemmt, da Wasserstoff als Inhibitor die weitere Umwandlung von Methan bremst.

Bei den Versuchen bei 1.000 °C und Methanstoffmengenanteilen im Eduktgas von 0,3-1 zeigt sich auch eine Abhängigkeit des Methanumsatzes vom Stoffmengenanteil

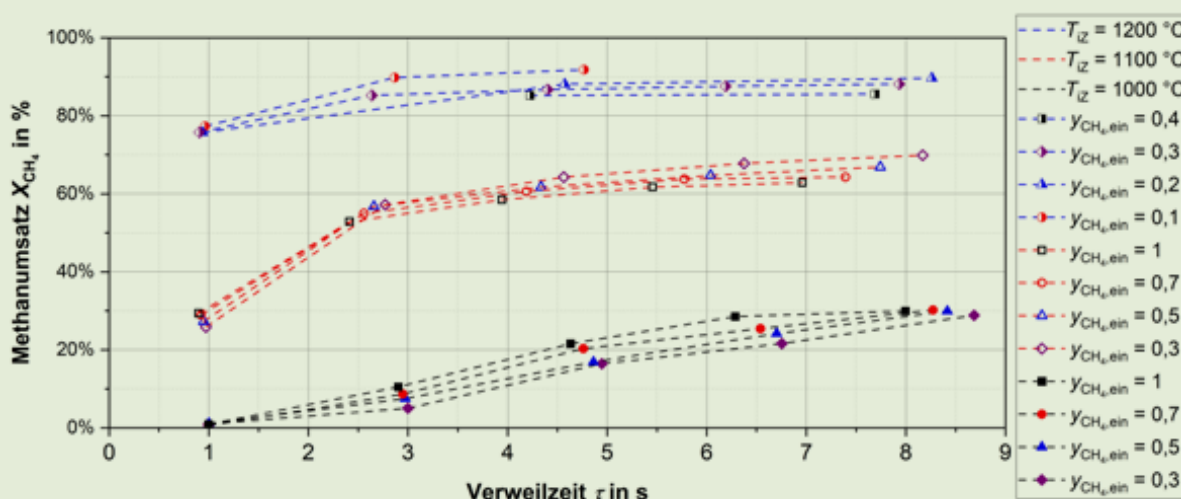


Bild 1.8: Methanumsatz für verschiedenen $y_{CH_4, ein}$, Temperaturen und Verweilzeiten; $p = 1,05 - 1,15$ bar; Einsatzgas: CH_4 und N_2 (= jeweils Rest zu 100 %)

Methan im Einsatzgas. Mit steigendem Methananteil im Edukt nimmt der Umsatz zu. Für $1.100^\circ C$ ist der Methaneinfluss weniger ausgeprägt und es kommt ab einer Verweilzeit von 3 s zu einer Umkehr des Trends. Ist bei 1 s Verweilzeit der Methanumsatz für reines Methan noch am höchsten, so verringert sich dieser bei sinkender Verweilzeit.

Diese Umkehr der Methanumsätze lässt sich ebenfalls mit der zuvor beschriebenen Wasserstoffinhibierung erklären. So ist bei größeren Methananteilen im Eduktgas der Wasserstoffpartialdruck bei gleichem Methanumsatz im Reaktor größer und bremst die weitere Pyrolyse-Reaktion.

Durch die gezielte Zugabe von Wasserstoff zum Eduktgas sinkt der Methanumsatz stark ab, was die vorangegangenen Beobachtungen und deren Interpretation stützt. Dieser Effekt wird mit steigender Temperatur schwächer und der Wasserstoff hat einen geringeren Einfluss auf den Methanumsatz. Diese Beobachtungen werden in aktuell laufenden Versuchsreihen weiter systematisch untersucht und reaktionskinetisch ausgewertet, um das Verständnis der Vorgänge und die Qualität der Datenlage für die mathematische Modellierung weiter zu verbessern.

Ammoniak-Cracken

Wie u. a. in der DVGW-Kurzstudie „Transportoptionen von Wasserstoff“ (G 202224) gezeigt, ist Ammoniak als H_2 -Derivat oder H_2 -Transportvektor eine attraktive Möglichkeit zum effizienten Transport großer Wasserstoffmengen über lange Distanzen. Für die Umwandlung des Ammoniaks zurück zu Wasserstoff und Stickstoff am Bestimmungsort sind jedoch bislang noch keine für diese Anwendung optimierte Anlagenkonzepte verfügbar. Erste Demo-Projekte zum Ammoniak-Cracken stützen sich auf Adaptionen der Dampfreformierung von Erdgas als bewährte H_2 -Erzeugungs-Technologie. Bei der Neuentwicklung eines effizienten verfahrenstechnischen Konzeptes müs-

sen die Besonderheiten des Ammoniak-Crackens, insbesondere hinsichtlich Reaktorbeheizung, möglicher Katalysatoren und Werkstoffe, Betriebsparameterfelder und Edukt- bzw. Produktaufbereitung, berücksichtigt werden.

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. Der Fokus liegt dabei auf der Weiterentwicklung des eigentlichen Crack-Reaktors, z. B. auf der Auswahl geeigneter Katalysatoren und Einfluss von Feedverunreinigungen, und dem Wechselspiel mit dem Gesamtprozessdesign. Dazu sollen die Gesamtanlage und die speziell darauf abgestimmte Edukt- und Produktaufbereitungstechnologie betrachtet werden.

Ende 2024 wurde mit dem Umbau einer am EBI ceb vorhandenen Versuchsanlage für den experimentellen Teil der Untersuchungen begonnen und es wurden erste theoretische Betrachtungen und Auslegungsrechnungen im Projektkreis entworfen.

Elektrifizierung in der chemischen Industrie

Die Elektrifizierung verfahrenstechnischer Prozesse als Alternative zum Einsatz (fossiler) chemischer Energieträger in der chemischen Industrie wird aktuell an vielen Stellen mit Nachdruck vorangetrieben. Am EBI ceb ist dieses neue Forschungsthema eng verknüpft mit der Übernahme der Professur für Verfahrenstechnik chemischer Rohstoffe und Energieträger durch Prof. Frederik Scheiff. Da dieses Thema recht neu ist, befinden sich die Forschungsaktivitäten hierzu erst im Aufbau. Am EBI ceb werden speziell Konzepte untersucht, mit denen endotherme Reaktionsschritte als Teil von Wasserstoff-Transportketten elektrifiziert werden können. Als Bei-

spielreaktion wird die Methanol-Reformierung in einem widerstandsgeheizten katalytischen Reaktor untersucht, mit deren Hilfe am Bestimmungsort aus Methanol Wasserstoff erzeugt werden kann. Durch eine direkte Wärmeeinbringung in den Reaktionsraum, z. B. über eine integrierte, ohmsche Beheizung, reduzieren sich Widerstände des Wärmetransports, womit u. a. ein flexibleres Reaktordesign und modulare Konzepte ermöglicht werden. Bisher sind das Zusammenwirken der inneren Wärmefreisetzung mit der ablaufenden chemischen Reaktion und die generellen Designprinzipien für die Gestaltung von direkt elektrisch beheizten Reaktoren nur unzureichend untersucht und die Literatur hierzu ist sehr überschaubar. Die geplante Arbeit konzentriert sich daher zunächst auf die Charakterisierung und Bewertung von Heiz- und Trägerstrukturen für die ohmsche Beheizung sowie die Erarbeitung geeigneter, ggf. komplett neuer Reaktorkonzepte. Hierauf folgen die Untersuchung zu Betriebseigenschaften und Prozesseffizienz sowie die mathematische Modellbildung mit dem Ziel der Bewertung von Stabilität, Dynamik und Regelbarkeit. In 2025 wird sukzessive der Aufbau der notwendigen Laborinfrastruktur und der Versuchsaapparaturen fortgesetzt und an der Veröffentlichung erster Ergebnisse gearbeitet.

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. Um die ambitionierten Klimaziele der Europäischen Union erreichen zu können, ist es deshalb wichtig, neben der Einführung neuer Technologien ebenfalls Übergangslösungen für eine sich nur langsam ausdünnende Verbrenner-Bestandsflotte zu finden. Weiterhin werden Sektoren wie Schwerlasttransport oder Flugverkehr nicht auf kohlenstoffhaltige Kraft- und Treibstoffe wegen der hohen Energiedichte verzichten können.

Die Arbeitsgruppe forscht an der Weiterentwicklung von Synthesen für die Herstellung und Aufarbeitung von flüssigen Kohlenwasserstoffen. Im Bereich der Synthese wird an der mehrphasigen Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) gearbeitet, mit Fokus auf CO_2 als Ausgangsstoff sowie Verbesserungen durch Sorbenzien und das dazu nötige Reaktorkonzept. Im Bereich der Aufarbeitung, liegt der Fokus auf Hydroprocessing und der Herstellung von Kerosinfraktionen aus nachhaltigen Zwischenprodukten.

Das Projekt „Refineries for Future“ läuft seit Dezember 2022 und beschäftigt sich mit der Entwicklung, Validierung und Bewertung von möglichen nachhaltigen Raffineriekonzepten. Dabei soll die gesamte Kraftstoffpalette für Straßen-,

Flug- und Schiffsverkehr aus den nachhaltigen Ausgangsstoffen Fischer-Tropsch-Crude, Pyrolyseöl, Methanol und Wasserstoff bereitgestellt werden. Im Projekt sollen einzelne Technologiepfade optimiert und verknüpft werden. Die abgeleiteten Raffineriekonzepte werden außerdem ganzheitlich im Hinblick auf ihre Implementierung und einen erfolgreichen Markteintritt betrachtet. Die Arbeitsgruppe „Chemische Konversion erneuerbarer Energien“ unter Prof. Rauch beschäftigt sich am EBI mit den Methanol-basierten Produkten, genauer mit der Aufarbeitung der Schwerbenzinfraaktion aus dem Methanol-to-Gasoline Prozess zu einer Kerosinblending-Fraktion.

Mehrphasige Fischer-Tropsch-Synthese ausgehend von CO und CO_2

Bei der FTS wird Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2), zu Kohlenwasserstoffen (KWs) und Wasser umgesetzt. Für die stark exothermen Reaktionen sind im kommerziellen Maßstab dreiphasige Reaktionssysteme wie etwa Blasensäulenreaktoren präferiert, da sie durch die hohe Durchmischung mit der Wärmekapazität der Flüssigphase einen isothermen Betrieb ermöglichen. Die FTS kann direkt von CO_2 statt CO als Edukt stattfinden, wenn der verwendete Katalysator ebenfalls die reverse Wassergas-Shift Reaktion (RWGS) katalysiert. Dies ist besonders interessant im Zusammenhang mit PtL Prozessen, da dort CO_2 und H_2 als Edukte verwendet werden.

Im Verbundprojekt InnoSyn („Innovative Synthesen flüssiger Energieträger in lastflexiblen Blasensäulen“), das August 2024 endete, wurde erstmalig das Zusammenspiel der direkten CO_2 -FTS und einem mehrphasigen Reaktionssystem untersucht.

Die überarbeitete Laboranlage aus Rührkesselreaktor, Gas- und Wasserdosierung, Abscheidern, Gaschromatograph und Diodenlaser zur Bestimmung von H_2O lief im Jahr 2024 über 1.500 h im Reaktionsbetrieb der CO_2 -FTS. Bei den Versuchskampagnen wurde primär ein Vollkatalysator aus Fe und Al_2O_3 mit K und Cu dotiert verwendet, der mittels „Organic Combustion“ beim Projektpartner LIKAT hergestellt und charakterisiert wurde. In den ersten Projektjahren stellte sich dieser Katalysator als besonders aktiv in der Produktion langkettiger KW heraus [1]. Allerdings stellten dabei mangelnde mechanische Festigkeit und Deaktivierung durch zu hohen Wasserpartialdruck Herausforderungen dar.

Der Einfluss von H_2O wurde gezielt durch Dosierung von verschiedenen Konzentrationen von Wasserdampf im Eduktstrom untersucht und anhand von reaktionstechnischen Kennzahlen quantifiziert. Für den Einfluss auf die Stabilität des Katalysators wurden nach jeder Wassermenge wieder dieselben Referenzbedingungen angefahren wie in **Bild 1.9** zu sehen ist.

Während sich die Umsätze der RWGS und FTS nur minimal reduzierten, blieb die Produktverteilung (ersichtlich anhand der Kettenfortpflanzungswahrscheinlichkeit α) unbeeinflusst. Ab einer dosierten Wassermenge von 6 % im Feed, die zu einem Partialdruckverhältnis $p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{H}_2}$ am Reaktorausstritt von

0,15 führte, konnte eine irreversible Deaktivierung des Katalysators festgestellt werden: Die Umsätze bei Referenzbedingungen sanken relativ um mehr als 10 %. Im Zuge einer in-situ Reaktivierung des Katalysators konnten alle Selektivitäten wiederhergestellt werden, jedoch wurde der Gesamtumsatz X_{CO_2} nur auf 10 % wiederhergestellt. Begründet werden konnte dies durch von LIKAT nachgewiesene Koksbildung auf dem Katalysator. Die Grenzkonzentration an H_2O bedeutet eine starke Limitierung der erreichbaren Produktausbeute pro Reaktordurchgang, sodass dies eine zentrale Randbedingung für den Scale-Up darstellen wird.

Ausreichende mechanische Festigkeit des Katalysators ist hier ebenfalls relevant, da im Betrieb der Blasensäule der Feinanteil (Partikel kleiner als $10\ \mu\text{m}$) ausgetragen wird und somit nicht mehr an der Reaktion teilnehmen oder zu Komplikationen im Downstream führen kann. Diesbezüglich wurde festgestellt, dass der verwendete Katalysator im Rührkesselbetrieb nur im aktivierten Zustand zerkleinert wurde. Der Großteil fand während der Phasenumwandlung von Fe_2O_3 hin zu den aktiven Phasen Fe_3O_4 und Fe_5C_2 in den ersten 72 h statt, wobei über 12 vol.-% Feinanteil generiert wurde. Im stabilen Betrieb waren es etwa 1 vol.-% pro Tag. Im Vergleich entstanden bei einem industriellen Katalysator bei gleichen hydrodynamischen Bedingungen lediglich 0,17 vol.-% Feinanteil pro Tag. Eine mögliche Lösung für die zukünftige Anwendung besteht darin, den Katalysator ex-situ zu aktivieren und dann, wie es in der Industrie üblich ist, die gröbere Fraktion in den Reaktor zu überführen.

Abschließend wurde mit den Ergebnissen einer Parameterstudie ein kinetisches Modell aufgestellt, dass die Reaktionsgeschwindigkeiten der RWGS und konsekutiver FTS mit einem Fehler $< 15\%$ beschreibt. Bei der Studie wurde insbesondere der Einfluss von CO untersucht, da durch Co-feeding geringer Mengen von $\sim 5\ \text{mol}\%$ im Feed bereits eine Steigerung der relativen Kohlenwasserstoffausbeute von fast 50 % sowie eine Verschiebung des Produktspektrums hin zu längeren Ketten möglich war. Mithilfe der experimentellen Daten

wurde ein vom DVGW erstelltes Modell für die CO_2 -FTS in ASPEN um die Produktverteilung sowie erzielbare Umsätze erweitert und erste energetische Betrachtungen zur Optimierung des Prozesses durchgeführt. Hierbei erschien vor allem die Nutzung einer Druckwechseladsorption zielführend, um die Ausnutzung des H_2 zu maximieren.

Aktuell werden die Ergebnisse für eine Prozesssimulation in MATLAB verwendet, um einen optimalen Betriebspunkt für einen Scale-Up zu identifizieren. Das ASPEN Modell wird gemeinsam mit dem DVGW weiterentwickelt, um Gesteungskosten und eine optimierte Prozessverschaltung angeben zu können. Ferner sollen Versuche in einem Blasensäulenreaktor in Kooperation mit Partnern in Wien durchgeführt werden, um die Tragweite des Abriebs sowie die Validität der Kinetik festzustellen.

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

Neues Reaktorkonzept für die sorptionsgestützte CO_2 -Fischer-Tropsch-Synthese

Die sorptionsgestützte Reaktionstechnik ermöglicht es, die zuvor beschriebene Limitierung des CO_2 -Umsatzes bei einem Partialdruckverhältnis von $p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{H}_2} = 0,15$ zu überwinden. Dies kann durch die Zugabe von Sorbenzien erreicht werden, wobei sich insbesondere molekulare Siebe wie die Zeolith-Typen LTX und LTA als geeignet erweisen. Um dieses Konzept experimentell zu überprüfen, wurde die Adsorptionskapazität des Zeoliths 4A (Typ LTA) bei $T = 230\ ^\circ\text{C}$ und $p = 25\ \text{bar}$ und einem Wasserpartialdruck von $> 1\ \text{bar}$, typisch für die dreiphasige CO_2 -FTS, bestimmt. Eine Besonderheit der Fischer-Tropsch-Laboranlage ist die Möglichkeit, den Wasservolumenanteil im Produktgasstrom mit einem steuerbaren Inline-Diodenlaser-Spektrometer zu messen. Mit diesem Messgerät war es nicht nur möglich die Adsorptionskapazität zu bestimmen, es konnte auch ein notwendiges Verhältnis von Sorbens zu Katalysator abgeschätzt werden. Mit diesen

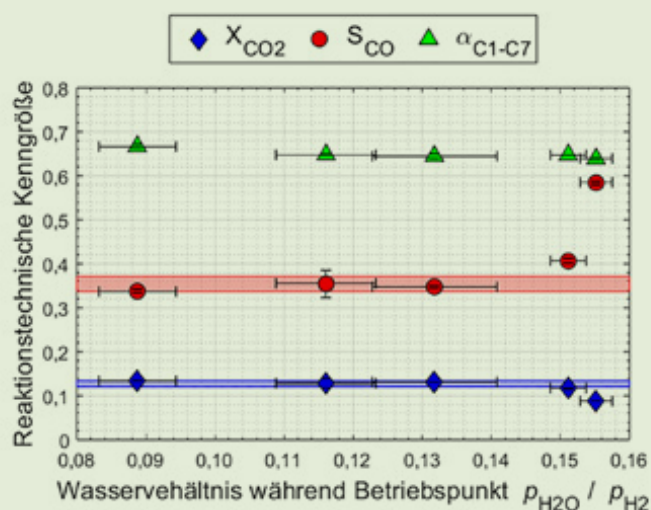


Bild 1.9: Einfluss von Wasser auf die Stabilität des Katalysators

Erkenntnissen wurde im Rahmen einer Masterarbeit erstmals das Konzept der sorptionsgestützten CO₂-FTS im Rührkesselreaktor getestet. Die Ergebnisse zeigten einen deutlich niedrigeren alpha-Wert als erwartet, was auf lokale Überhitzungen zurückgeführt werden kann. Durch den deutlich höheren Feststoffanteil im Vergleich zu Versuchen ohne Sorbens, reichte die Rührerdrehzahl nicht aus, was eine schlechte Durchmischung im Reaktor zur Folge hatte. Die Arbeiten an der sorptionsgestützten CO₂-FTS werden mit den neuen Erkenntnissen im Laufe des Jahres 2025 fortgesetzt.

Neben den reaktionstechnischen Aspekten wird zusätzlich an einem neuen Reaktorkonzept geforscht, welches sich insbesondere 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. H₂ 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 im neuen Reaktorkonzept mit Hilfe eines Kaltmodells, betrieben mit Wasser und Druckluft unter Umgebungsbedingungen, untersucht. Anfang des Jahres 2024 wurde eine Publikation veröffentlicht, die die Abhängigkeit der Flüssigzirkulation vom Gasgehalt und geometrischen Parametern zeigt, wie in **Bild 1.10** zu sehen [2]. Dabei wurde die Wasserqualität, gemessen an der elektrischen Leitfähigkeit (σ_{el}), der Gasvolumenstrom $\dot{V}_{G,tot}$ sowie der Loop-Durchmesser (d_l) und die Höhe des Flüssig-

keitsauslasses ($h_{l,exit}$) variiert. Es konnte eine lineare Abhängigkeit zwischen Gasgehalt ε_g und Flüssigkeitszirkulationsstrom (engl.: Liquid circulation rate – LCR) identifiziert werden, der auf die entstehenden Dichteunterschiede zurückzuführen ist. Durch Änderungen der Reaktorgeometrie lässt sich diese Gerade verschieben.

Darauf aufbauend wurde das Kaltmodell mit einem Coriolis-Messgerät ausgerüstet, welches es ermöglicht, den Massenstrom sowie die Dichte im Zirkulations-Loop zu messen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde der Einfluss von verschiedenen Massenanteilen an SiC auf die Zirkulationsrate untersucht. Bei bis zu 20 Gew.-% SiC konnte eine stabile Zirkulation bei unterschiedlichen Gas-Leerrohrgeschwindigkeit und mehr als 2.000 Stunden Betriebszeit erreicht werden. Diese Ergebnisse zeigten erstmals die Eignung des neuen Reaktorkonzepts für dreiphasige Synthesen.

Ziel des Jahres 2025 ist es, das Kaltmodell bei höheren, für die Industrie relevanten Feststoffkonzentrationen zu betreiben sowie den Einfluss von Partikeleigenschaften auf die Zirkulation zu identifizieren. Neben den Untersuchungen am Kaltmodell soll weiterhin an der sorptionsgestützten CO₂-FTS im dreiphasigen Rührkessel geforscht werden.

Die Forschungsarbeiten zum neuen Reaktorkonzept für die sorptionsgestützten CO₂-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 oder Blending, um normgerechte Flugtreibstoffe zu erhalten. Hydroprocessing-Verfahren sind entscheidend für die Aufarbeitung von SAF und beinhalten verschie-

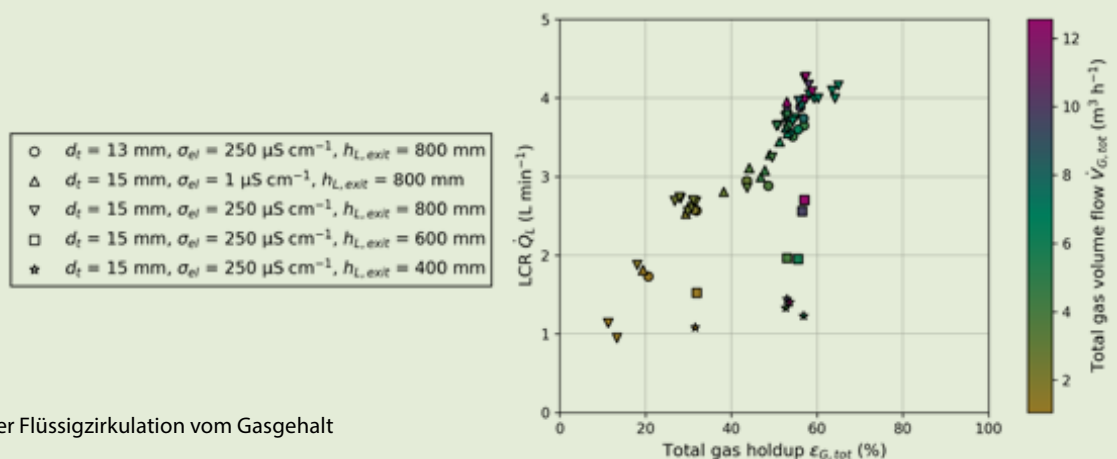


Bild 1.10: Abhängigkeit der Flüssigzirkulation vom Gasgehalt

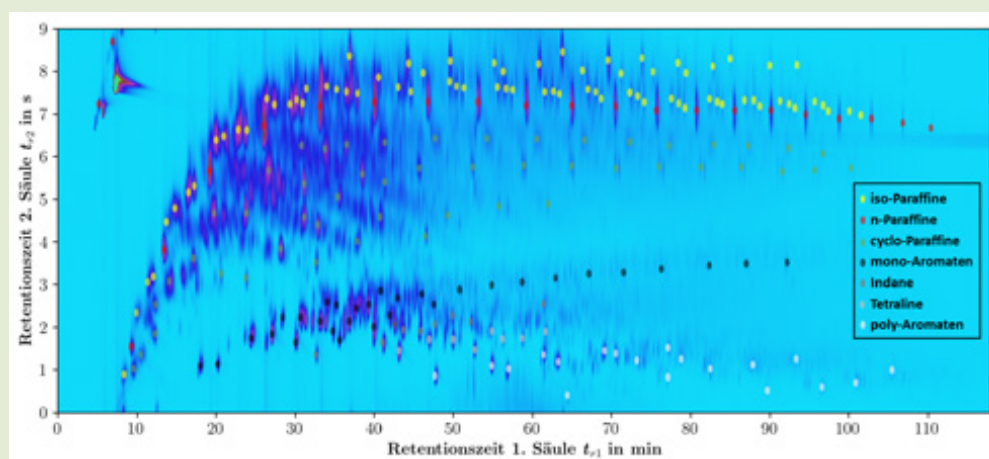


Bild 1.11: Analyse von Mitteldestillat mit zweidimensionalem Gaschromatographiesystem

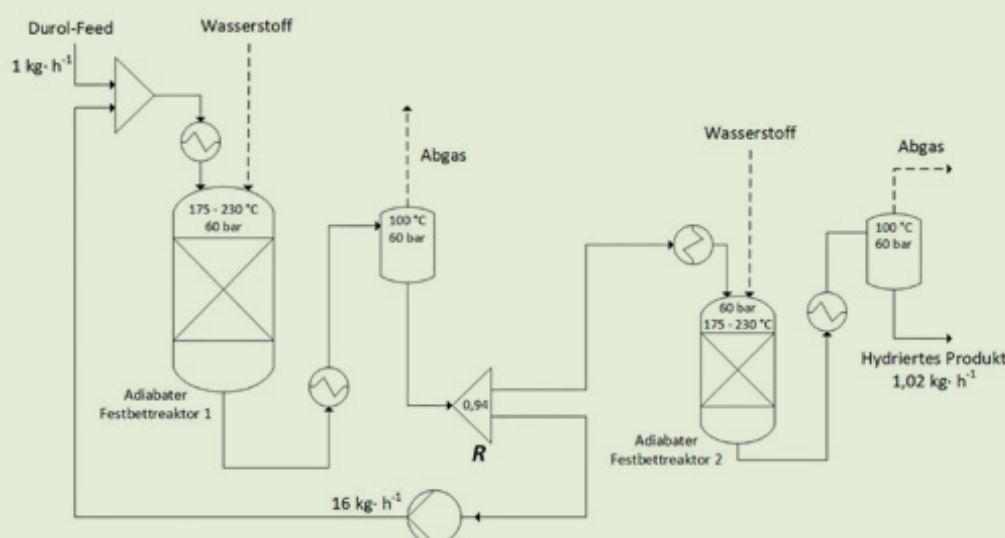


Bild 1.12: skalierbares Reaktorkonzept für einen gekühlten Hydrierreaktor

dene katalytische Reaktionen wie Hydrieren, 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.

Für die Analytik von komplexen Kohlenwasserstoffmischungen wurde 2024 ein zweidimensionales Gaschromatographiesystem (GCxGC) in Betrieb genommen. Im Zuge einer Methodenoptimierung und Kalibrierung konnte eine qualitative und quantitative Stoffgruppenanalyse von Mitteldestillatproben etabliert werden (vgl. **Bild 1.11**). Die Methode konnte erfolgreich auf FT- und MtX-Produkte angewendet werden.

Fokus lag im Zuge des REF4FU-Projekts 2024 außerdem auf der Aufarbeitung der Schwerbenzinfraktion des Methanol-to-Gasoline(MtG)-Prozesses zu einer Kerosinblendingkomponente. Das erfolgreiche Upgrading der Schwerbenzinfraktion 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 aromatenreichen Rohprodukt mit sich bringen, führt jedoch zur Verschlechterung der Stoffeigenschaften im Hinblick auf Siedekurve und Dichte. Erste Forschungsergebnisse unterstützen die mögliche Herstellung eines cyclo-Paraffin-reichen Raffineriestroms, der sich als Kerosinblending-Fraktion eignet. Die Aromatenhydrierung ist eine stark exotherme Reaktion mit Reaktionsenthalpien von ca. $-200 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, weshalb die Wärmeabfuhr bei der Hydrierung von Schwerbenzin im industriellen Maßstab an Bedeutung gewinnt. Am EBI wurde 2024 deshalb ein skalierbares Reaktorkonzept für einen gekühlten Hydrierreaktor im $1 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ entwickelt. Die entwickelte Hydrieranlage basiert auf zwei in Reihe geschalteten adiabater betriebenen Rohrreaktoren mit Rieselbettströmung, wobei der erste durch einen hohen Rückflussstrom indirekt gekühlt wird (vgl. **Bild 1.12**). Die entwickelte Anlage wurde in Aspen Plus abgebildet und simuliert. Dazu wurden im Labormaßstab kinetische Untersuchungen mit der Modellkomponente Durol und realen Schwerbenzin Proben durchgeführt.

Im Jahr 2025 soll der Fokus vermehrt auf der Produktcharakterisierung des hydrierten MtG-Schwerbenzins liegen und Versuche zum Hydrocracking und Isomerisieren von FT-Produkten zu SAF durchgeführt werden.

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

- [1] A. Fedorov, P. A. Graefe, A. Perechodjuk, R. Rauch, S. Wohlrab and D. Linke, Appl. Catal. Gen., 2024, 680, 119749.
[2] W. Asbahr, R. Lamparter and R. Rauch, ChemEngineering, 2024, 8, 52.

1.5.3 Arbeitsgruppe „Materialsynthese und Scale-up“

Moritz Wolf, Asad Asadli, Angelina Barthelmeß, Elisabeth Herzinger, Cherie Hsu, 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 verortet. Der Schwerpunkt der Arbeitsgruppe liegt auf der Entwicklung von Katalysator- und Prozesstechnologien für die chemische Energiespeicherung und nachhaltige Grundchemikalien als wesentliches Kernelement einer erfolgreichen Energie- und Rohstoffwende. Die enge Zusammenarbeit mit der chemischen Industrie (z. B. Clariant, Hydrogenious LOHC Technologies, INERATEC, Sasol) sowie nationalen und internationalen Partnern (z. B. Forschungszentrum Jülich, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Helmholtz-Zentrum Berlin, Universität Kapstadt, Universität Padua) ist dabei essenzieller Bestandteil der Forschungsarbeit. Eine dieser Kooperationen ermöglichte in 2024 die anteilige Durchführung einer KIT-Masterarbeit an der Universität Kapstadt. EBI-ceb Alumnus Prof. Dr.-Ing. Michael Claeys (Promotion unter Prof. Dr. Hans Schulz in 1998) war über drei Monate Gastgeber am Catalysis Institut der Universität Kapstadt und ermöglichte so die experimentelle Testung Kobalt basierter Hydrierungskatalysatoren im Rahmen des CARE-O-SENE Projekts.

Neuartige Katalysatormaterialien für die CO₂-Aktivierung

Im Projekt werden Synergieeffekte beim Einsatz von mit Kohlenstoffnitrid modifizierten Trägermaterialien für Kobalt basierte Katalysatoren für die Umwandlung von CO₂ untersucht. Die Auflösung der Struktur der modifizierten Materialien und der Einfluss auf darauf geträgerte Kobaltanopartikel während der Katalysatorherstellung, -aktivierung sowie der katalytischen Anwendung bedarf über den internen Laborbetrieb hinausgehende, spezielle Charakterisierungsmethoden. Im vergangenen Jahr wurde die Morphologie mittels Nano-computertomographie am MAX IV Teilchenbeschleuniger in Schweden untersucht. Die Wechselwirkungen mit Kobalt sowie dessen Phasenumwandlungen konnten mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie am KIT-Synchrotron KARA während der Aktivierung und der Katalyse aufgelöst werden.

Produktion von nachhaltigem Kerosin

Das Projekt CARE-O-SENE (<https://care-o-sene.com/>) befindet sich mittlerweile im 3. Jahr, sodass auch die Arbeiten im Rahmen der Synthese von Modellkatalysatoren und Referenzmaterialien für Fischer-Tropsch-Katalysatoren immer anwendungsorientierter werden. Zur Herstellung der Zusammenhänge zwischen Struktur und Aktivität, Selektivität und Stabilität wurden auch im vergangenen Jahr wieder mehrere Messkampagnen an Teilchenbeschleunigern (u. a. BESSY II am Helmholtz-Zentrum Berlin und KARA am KIT) durchgeführt. Darüber hinaus fanden erste Aktivitätstests in mit der Fischer-Tropsch-Synthese verwandten Anwendungen statt.

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 Induktionsbeheizung werden in Trägerkatalysatoren für die Emissionskontrolle integriert, was eine schnelle Aufheizung aufgrund der Wärmeentstehung im Katalysatorbett ermöglicht. Empfängermaterialien, sogenannte „Susceptors“, können auch in direkten Kontakt mit dem Katalysator gebracht werden. Abgesehen vom enormen Potenzial der Elektrifizierung industrieller Prozesse ermöglicht die induktive Beheizung eine Prozessintensivierung, kann die Energieeffizienz steigern und stellt ein hochdynamisches Beheizungskonzept dar. Insbesondere die letztgenannte Eigenschaft wird für die induktive Beheizung von Katalysatoren für die Emissionskontrolle mit mehreren skalenübergreifenden Ansätzen erforscht, wofür eine neue Testanlage aufgebaut wurde (Bild 1.13).

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

Die Nutzung von regenerativem Wasserstoff als Energieträger oder Ausgangsstoff bringt unzählige Vorteile für die Umwelt, die Energiesicherheit, die Wirtschaft und den Endverbraucher mit sich. Die kosteneffiziente, sichere, kompakte und vereinfachte Speicherung stellen dabei wesentliche Voraussetzungen dar. Dies kann durch die Nutzung von flüssigen organischen Wasserstoffträgern (engl. Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) erreicht werden. LOHC-Systeme bestehen aus Paaren von wasserstoffarmen und wasserstoffreichen organischen Verbindungen, mit welchen durch wiederholte katalytische Hydrierungs- und Dehydrierungszyklen Wasserstoff gespeichert bzw. freigesetzt werden kann. Zur vollen Entfaltung der Wasserstoffspeicherkapazität ist eine hohe Selektivität der eingesetzten Katalysatoren bei gleichzeitig hohem Umsatz erforderlich. Dies wird bereits mit einigen geträgerten Katalysatorsystemen auf Basis von Platin erreicht, wobei bimetallische Katalysatoren oft eine gesteigerte Aktivität und/oder Stabilität aufweisen [1]. Die Entwicklung von angepassten Reaktorkonzepten ist für die Steigerung der Produkti-

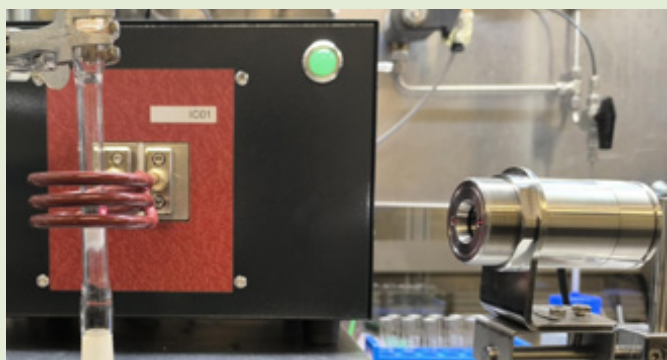


Bild 1.13: Teststand zur Entwicklung von Materialien für die induktive Beheizung von Katalysatorfest-betten mit einem Pyrometer zur Temperaturemessung.

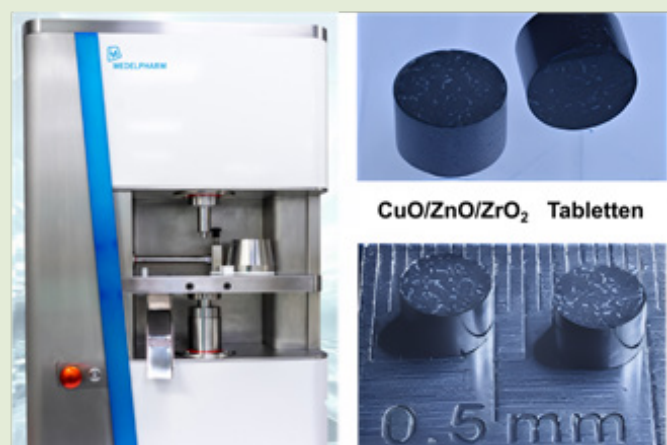


Bild 1.15: Tablettierungsmaschine und hergestellte 3 mm Tabletten eines Kupfer basierten Katalysators für die Methanolsynthese

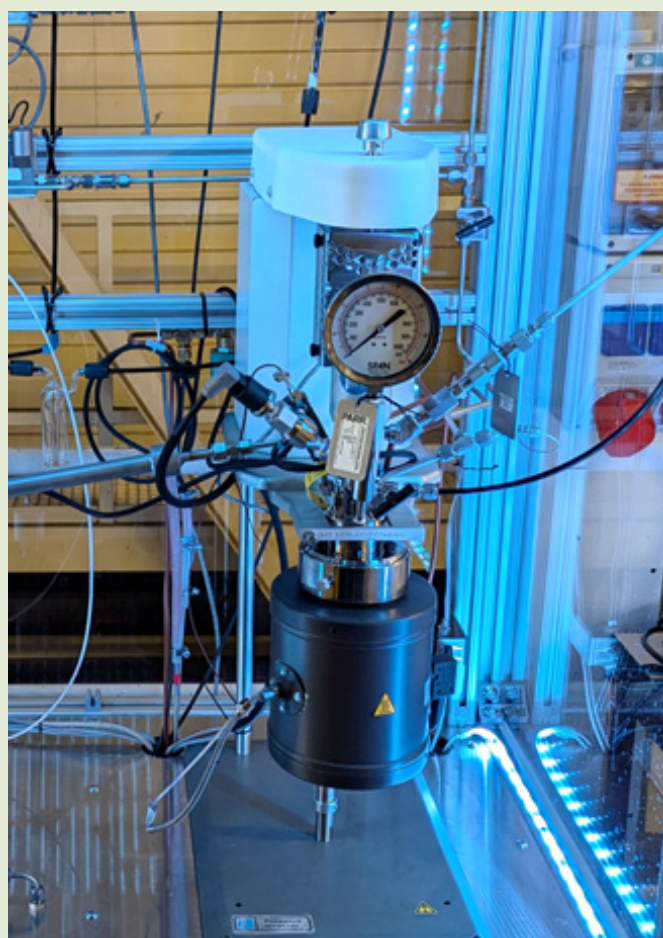


Bild 1.14: Kontinuierlicher Dreiphasen-Rührkesselreaktor zur technischen Dehydrierung von LOHCs.

vität technischer Reaktoren sowie von Katalysatoren in der Dehydrierung von großem Interesse. Im vergangenen Jahr wurde ein kontinuierlich betriebener Dreiphasen-Rührkesselreaktor (**Bild 1.14**) in Betrieb genommen und reaktionstechnische Parameter optimiert. Die entwickelten Versuchsprotokolle dienen gleichermaßen zur Weiterentwicklung des Reaktorkonzepts und der Optimierung der Katalysatorzusammensetzung.

Tablettierung von Katalysatoren

Für die technische Anwendung von Katalysatoren müssen die meist pulverförmigen Katalysatormaterialien mit Partikelgrößen im Mikrometerbereich mittels Formgebung in stabile dreidimensionale Geometrien im Millimeterbereich überführt werden. Die genaue Anforderung hängt insbesondere vom Reaktorkonzept ab und betrifft sowohl Vollkatalysatoren als auch Trägerkatalysatoren. Während der Formgebung können anwendungsrelevante Eigenschaften beeinflusst werden und es werden im Vergleich zu Pulverkatalysatoren zusätzliche Komponenten, wie beispielsweise Schmiermittel oder Binder,

für die Herstellung der Formkörper benötigt. Entsprechend wird in diesem Projekt der Einfluss diverser Parameter während der Tablettierung auf die physikalischen und chemischen bis hin zu katalytischen Eigenschaften erforscht. Als erstes Katalysatorsystem wird ein Kupfer basierter Katalysator für die Methanolsynthese verwendet (**Bild 1.15**), welcher unter Zusammenarbeit des IKFT und des Instituts für Thermische Verfahrenstechnik (TVT) großskalig hergestellt wurde. Die Formgebung erfolgt in einer hochinstrumentierten Tablettierungsmaschine für die kontinuierliche Produktion bei gleichzeitiger Aufzeichnung einer Vielzahl von Daten.

- [1] D. Strauch, P. Weiner, B. Bikash Sarma, A. Körner, E. Herzinger, P. Wolf, A. Zimina, A. Hutzler, D.E. Doronkin, J.-D. Grunwaldt, P. Wasserscheid, M. Wolf, *Catal. Sci. Technol.* 2024, 14, 1775.

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 „Material and Technologies for the Energy Transition“ (MTET) mit Forschungsthemen zur Flugstromvergasung. Das EBI ceb unterstützt diese anwendungsbezogenen Arbeiten an Technikutums- und Pilotanlagen mit der Forschungstätigkeit zur Brennstoffcharakterisierung fester und flüssiger Brennstoffe und Zwischenprodukte.

Kinetik der Feststoffvergasung von biogenem Koks

Bei der Flugstromvergasung werden Brennstoff-Partikel aus den eingesetzten Suspensionsbrennstoffen mit Wasserdampf und CO_2 zu Synthesegas umgesetzt. Am EBI ceb wird das Vergasungsverhalten von festen Zwischenprodukten der Flugstromvergasung im differentiellen Festbettreaktor untersucht. Die Arbeiten werden von Stella Walker, M. Sc., im Rahmen ihrer Promotion durchgeführt.

Im Jahresbericht 2023 wurden erste experimentelle Ergebnisse des druckbeaufschlagten differentiellen Festbettreaktors (dFBR) vorgestellt. Dieser wurde entwickelt, um den Partikelumsatz der Feststoffvergasung bei einem Gesamtdruck von 20 bar mit Wasserdampfpartialdrücken bis 12,5 bar und CO_2 -Partialdrücken bis 20 bar zu untersuchen. Basierend auf dem Partikelumsatz wird die Mikrokinetik der Vergasungsreaktionen ermittelt. Die Experimente werden im kinetisch kontrollierten Bereich durchgeführt, welcher bei heterogenen Vergasungsreaktionen im Bereich von Temperaturen unter 900 °C liegt. In diesem Bereich werden die beobachteten, effektiven Reaktionsgeschwindigkeiten nicht vom Stofftransport durch die Grenzschicht um das Partikel und in der porösen Struktur des Partikels beeinflusst.

Ziel der Forschungsarbeiten in 2024 war es, die im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn Christoph Schneider ermittelte Vergasungskinetik für Wasserdampf [1] auf höhere Partialdrücke zu erweitern, um die Reaktionsgeschwindigkeiten von zwei exemplarischen Buchenholzkoksen bei technisch relevanten Vergasungsatmosphären von Dampf- und CO_2 -Partialdrücken bis 10 bar zu beschreiben.

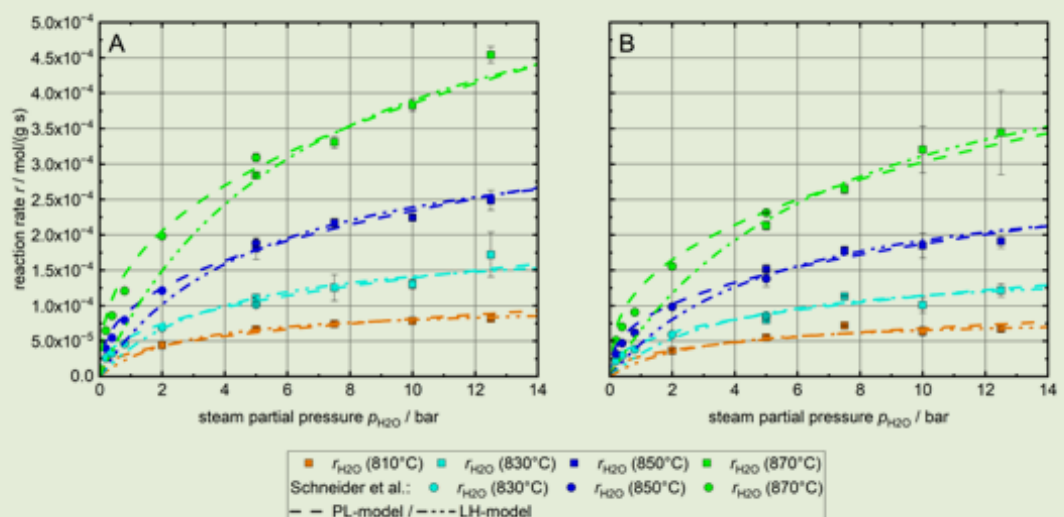
Die untersuchten Koksfraktionen wurden bei 1400 °C bzw. 1600 °C in einer Sekundärpyrolyse erzeugt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Mikroporenoberfläche, der Graphitisierung und der Dispersion der Asche-Komponente Calcium auf der Koks Oberfläche [2].

In ihrer ersten Veröffentlichung als Erstautorin leitet Frau Walker ein Kriterium zur Überprüfung des differentiellen Betriebs des Festbettes her. Hiermit kann sichergestellt werden, dass die Partikelkinetik und nicht die Festbettkinetik gemessen wird. Zudem beschreibt Frau Walker das Systemantwortverhalten des differentiellen Festbettreaktors (dFBR) und integriert den entwickelten mathematischen Ansatz in die Auswerteroutine für die Kinetik-Experimente [3].

Anschließend wurden Vergasungsexperimente mit Gemischen aus Dampf und Argon durchgeführt, um die Reaktionskinetik der heterogenen Wassergasreaktion zu bestimmen. Bei beiden Koksqualitäten führt eine Erhöhung des Wasserdampfpartialdrucks zu einer Erhöhung der Reaktionsrate, was darauf hindeutet, dass die reaktive Oberfläche bei diesen Reaktionsbedingungen noch nicht gesättigt ist (Bild 1.16). Die Experimente zeigten eine höhere Reaktionsrate mit Wasserdampf für den bei 1.400 °C pyrolysierten Koks. Dies wurde durch die höhere Anzahl von aktiven Zentren und die größere Mikroporenoberfläche erklärt. Bei der Vergasung mit CO_2 ergab sich aufgrund der höheren Calciumdispersion für den bei 1.600 °C pyrolysierten Koks eine höhere Reaktionsrate im Vergleich zum 1.400 °C pyrolysierten Koks [1,2].

Das Zusammenspiel von Wasserdampf und CO_2 wurde in Vergasungsversuchen bei Wasserdampfpartialdrücken zwi-

Bild 1.16: Einfluss des Wasserdampfpartialdrucks auf die Reaktionsrate der heterogenen Wassergas-Reaktion für den bei 1400°C (A) und bei 1600°C (B) pyrolysierten Koks in Abhängigkeit der Temperatur.



schen 2 bar und 9 bar und CO_2 -Partialdrücken zwischen 9 bar und 17,5 bar untersucht.

Für die Einzelgase konnte die Reaktionskinetik der beiden untersuchten Koksfraktionen durch einen Potenzansatz oder Langmuir-Hinshelwood-Ansatz beschrieben werden. Für Gasgemische zeigt sich allgemein, dass die Reaktionsgeschwindigkeit bei niedrigen Partialdrücken von H_2O und CO_2 zunächst durch eine Addition der Geschwindigkeiten der Einzelgase beschrieben werden kann, während die Reaktionsgeschwindigkeit für höhere Partialdrücke durch diesen additiven Ansatz überschätzt wird und somit ein Übergang zu kompetitivem Verhalten erfolgt.

Für technisch relevante Reaktionsbedingungen bis $p_{\text{CO}_2} = 10$ bar und $p_{\text{H}_2\text{O}} = 10$ bar konnte gezeigt werden, dass für den bei 1.400 °C pyrolysierten Koks die Gemischkinetik in guter Näherung additiv beschrieben werden kann. Ein Beginn der Sättigung der aktiven Zentren und ein damit einhergehender Übergang zum kompetitiven Verhalten wurde erst bei höheren CO_2 -Partialdrücken beobachtet. Aufgrund der höheren Anzahl an aktiven Zentren im Vergleich zu dem bei 1.600 °C pyrolysierten Koks ist hier die Reaktionsrate auch in Gemisch-Atmosphäre in einem weiten Partialdruckbereich höher.

Bei der Gemischvergasung des bei 1.600 °C pyrolysierten Kokes konnte die Reaktionsrate nur bis zu einem Dampf- und CO_2 -Partialdruck von 2 bar mit dem additiven Ansatz beschrieben werden. Aufgrund der höheren Graphitisierung und der geringeren Anzahl an aktiven Zentren tritt der Übergang zur Sättigung hier deutlich früher auf. Eine Publikation zur Darstellung der Ergebnisse ist in Vorbereitung.

In den folgenden Arbeiten soll der Einfluss der Produktgase CO und H_2 als Inhibitoren auf die Reaktionskinetik der Vergasung untersucht werden.

Die Kinetikdaten fließen in die CFD-Modellierung zur Auslegung eines technischen Flugstromvergasers ein.

- [1] *Schneider, C.; Zeller, M.; Böhm, D.; Kolb, T.*: Influence of pressure on the gasification kinetics of two high-temperature beech wood chars with CO_2 , H_2O and its mixture; *Fuel* 299, 3, 2021, DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120523.
- [2] *Schneider, C., Walker, S., Phounglamcheik, A., Umeki, K., and Kolb, T.* 2021. Effect of calcium dispersion and graphitization during high-temperature pyrolysis of beech wood char on the gasification rate with CO_2 . *Fuel* 283, 3, 118826.
- [3] *Walker, S., Kolb, T.* 2025. Operation of a differential fixed bed reactor for investigations on micro-kinetics of heterogeneous gasification reactions. *Fuel* 381, 133561.

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, Arvind Menon, Lisa Merz, Jithin Mohan, Fariba Moradipour, Amin Khayatzadeh Praseeth Prabhakaran, Louis Wayas, Hannah Wolf

Auch 2024 stellte die Transformation der regionalen Energieversorgung ein wichtiges Aufgabengebiet dar. Im Kontext der kommunalen Wärme- und Transformationsplanung wurden verschiedene Forschungsvorhaben durchgeführt und insbesondere die zukünftige Entwicklung von Strom-, Wärme- und Gasnetzen untersucht und das Modellierungswerkzeug KoSy weiter ausgebaut. Weiterhin wurden verschiedenen Forschungs- und Anwendungsprojekte zur Umstellung von Gasverteilnetzen auf Wasserstoff bearbeitet. Weitere Themengebiete waren der Aufbau eines europäischen Wasserstofftransportnetzmodells und der Import von Wasserstoff und Derivaten. Eine Auswahl wird im Folgenden vorgestellt.

TrafoHyVe (BMWK)

Im Forschungsvorhaben TrafoHyVe wurde der Transformationsprozess eines Erdgasverteilnetzes hin zu einem Wasserstoffverteilnetz bearbeitet. Hierzu wurden technologische und infrastrukturelle Aspekte der Umstellung untersucht, um die Machbarkeit bzw. Defizite aufzuzeigen. Diese Betrachtungen erfolgte an den realen Verteilnetzen im Gebiet der Energieversorgung Filstal und der Stadtwerke Karlsruhe. Die Arbeitsgruppe Systeme und Netze führte im Rahmen dieses Projekts hydraulischen Netzberechnungen zur Prüfung auf Kapazitätsengpässe im Netz bei der Umstellung auf 100 Vol.-% Wasserstoff durch. Die zukünftigen Gasbedarfe (s. **Bild 1.17**) wurden anhand von Szenarien festgelegt und für die hydraulische Rechnung hypothetisch für jedes Stützjahr auf Wasserstoff bezogen. Insbesondere aufgrund der Umstellung auf andere Heiztechnologien und Energieträger sowie der fortschreitenden Sanierung von Wohngebäuden werden die Gasbedarfe bis 2050 deutlich zurückgehen. Auch im Industriesektor wurden Effizienzsteigerungen durch Elektrifizierung angenommen.

Für die hydraulische Berechnung wurde wie oben angesprochen angenommen, dass in dem betrachteten Jahr nur Wasserstoff und kein Erdgas im Verteilnetz transportiert wird. Somit ergibt sich aufgrund des geringeren Brennwertes von 3.54 kWh/m³ (NTP) zu dem angenommenen Brennwertes von Erdgas mit 11,3 kWh/m³ (NTP) ein ca. dreifach höherer Volumenstrom. Diese Volumenstromerhöhung kann nun jedoch in den Leitungen bei nicht veränderbaren maximalen Leitungsdrücken (MOP) und einem Grenzwert für die maximal zulässige Fließgeschwindigkeit von angenommenen 30 m/s zu kritischen Situationen in Hauptleitungen führen. Anzumerken ist, dass diese szenariobasierten Annahmen von der zukünftigen Realität abweichen können.

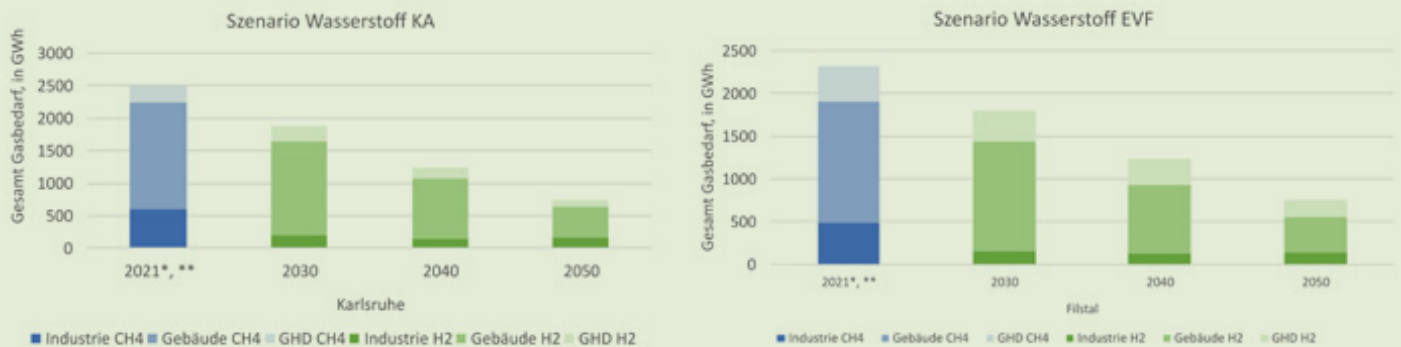
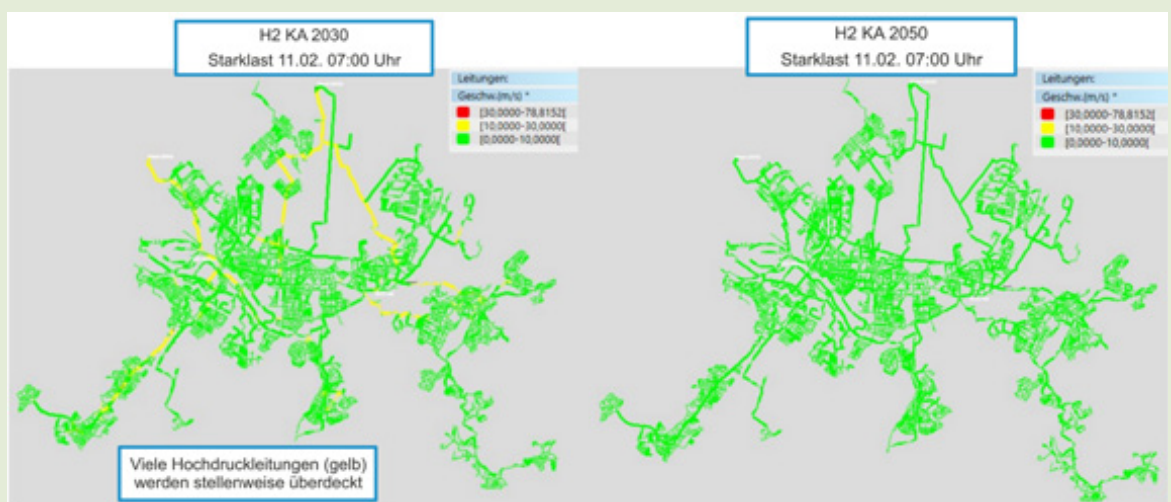


Bild 1.17: a, b) Verlauf der Szenario-basierten Entwicklung des Gasverbrauchs

Bild 1.18:
Hydraulische
Gasnetzberechnung
Karlsruhe

In Bild 1.18 ist zu erkennen, dass die zu verteilende Gasmenge 2030 zu wenigen Grenzsituationen im Gasnetz Karlsruhe führen würde. 2050 sind keine Grenzverletzungen mehr zu erkennen.

Für das Leitungsnetz der EVF (s. Bild 1.19) ergibt sich bei Wasserstoffbetrieb ein anderes Bild. Hier sind 2030 Druckabfälle in den Außenbereichen am Ende von Stichleitungen zu erkennen. Dies bedeutet, dass dort kein Gas mehr ankommen würde und somit für dieses Szenario-Stützjahr die Netze nicht geeignet sind. 2050 dagegen sind nur noch wenige kritische Zustände zu erkennen.

Somit konnte in dem Forschungsvorhaben festgestellt werden, dass Hauptleitungen städtischer Netze im Starklastfall anfälliger für Kapazitätsengpässe bei einer schnellen Umstellung entsprechend den Umsetzungsplänen des Wasserstoffkernnetzes sind als ländliche Netze. Diese dagegen können Versorgungsprobleme an den Enden von Stichleitungen aufweisen. Somit ist bei einer Umstellung auf Wasserstoff eine genaue Analyse im Vorfeld durchzuführen, um einen möglichen Anpassungsbedarf des Verteilnetzes abschätzen zu können.

TrafoKommunE (BMWK)

Im Projekt TrafoKommunE wurden der Transformationsprozesse mit Fokus auf die kommunale Energiewende untersucht. Es wurde der lokale Ausbau von erneuerbaren Energiequellen, die Nutzung alternativer Technologien (z. B. Wärmepumpen und batterieelektrische Fahrzeuge) und Sanierungsmaßnahmen am Beispiel der Stadt Karlsruhe untersucht. Die leitungsgebundene Energieinfrastruktur wurde auf die daraus resultierende notwendige Transformation analysiert. In TrafoKommunE wurden neben den technischen Maßnahmen auch mögliche Geschäftsmodelle für lokale Energieversorger betrachtet sowie Fragestellungen bezüglich der Akzeptanz von Stakeholdern. Darüber hinaus wurden die aktuellen politischen Rahmenbedingungen untersucht und es fanden Aktivitäten statt, die zur Aktivierung von Energieversorgungsunternehmen beitragen, eine aktive Rolle bei der lokalen Energiewende einzunehmen.

Der Energiebedarf im Gasnetz wird in den Szenarien als rückläufig gesehen (Bild 1.20 a, b, c). Die Gasnetzmodelle zeigen, dass die hydraulische Kapazität der bestehenden

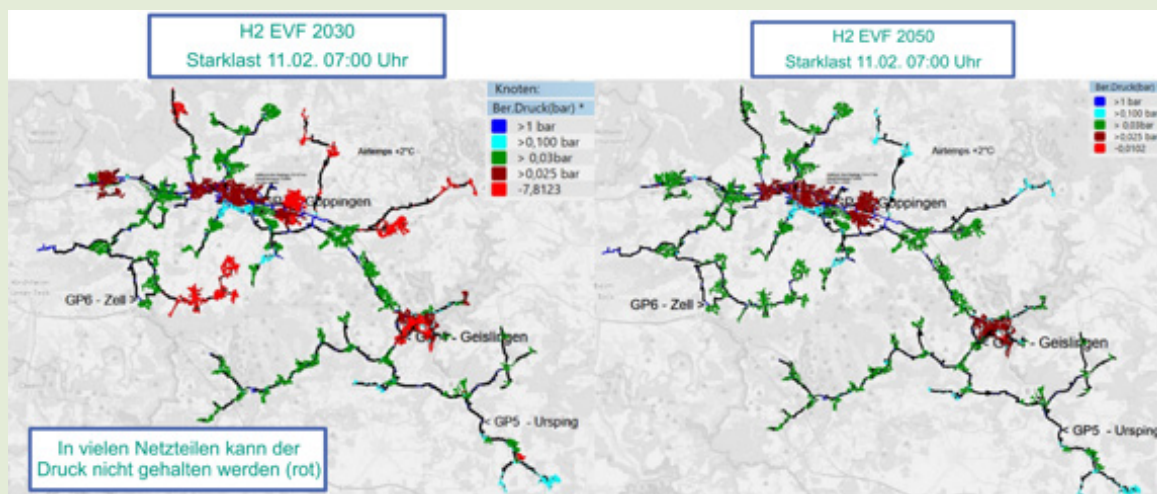


Bild 1.19: Verlauf der relativen Entwicklung des Gasverbrauchs

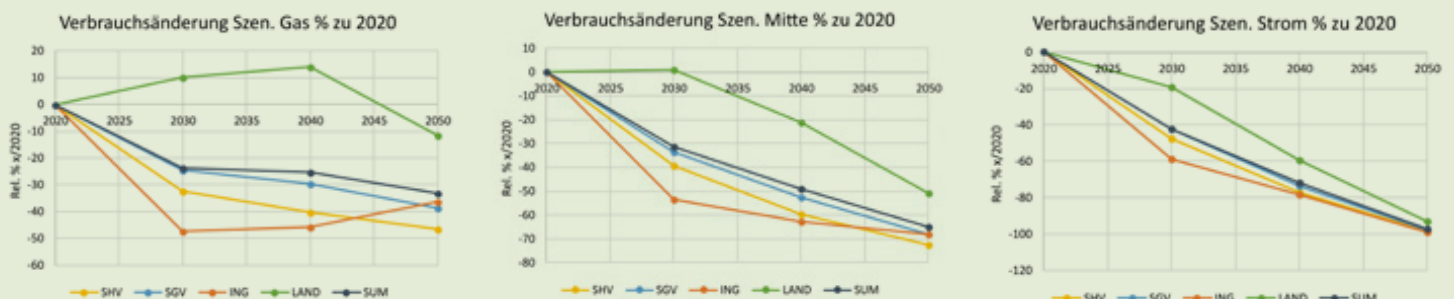


Bild 1.20: a, b, c) Verlauf der relativen Entwicklung des Gasverbrauchs
SHV: Quartier städtisch gering verdichtet (weniger Einwohner pro Fläche als SGV)
SGV: Quartier städtisch hochverdichtet
Ind/Gew: Industrielles Quartier
Land: ländlich geprägtes Quartier

Netze daher auch zukünftig ausreichend ist. Bei Unterschreitung der zulässigen Gasflüsse müssen möglicherweise Messeinrichtungen getauscht werden. Durch den Wechsel der Heizungstechnologie bei Kunden ist zu erwarten, dass Leitungen obsolet werden. Hierbei spielt für die nicht mehr benötigten Gasleitungsabschnitte die örtliche Verteilung der Gebäude, in denen von Gasheizungen auf eine andere Heizungstechnologie gewechselt wird, eine wichtige Rolle für die Länge des betriebenen Gasnetzes. Bei statistisch verteiltem bzw. unkoordiniert ablaufendem Heizungstausch beim Endkunden wird die Länge des Gasnetzes nur geringfügig abnehmen (Bild 1.21). Starke Abnahme ist dagegen bei konzentrierten Heizungsaustauschen, also in z.B. kleineren Gebieten und Straßenzügen, zu beobachten (Bild 1.22).

1.6.2. Arbeitsgruppe „Verfahrenstechnik“

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

Um die Klimaziele zu erreichen, werden neben elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen auch große Mengen an klimafreundlichen chemischen Energieträgern benötigt. Die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik (AG-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.

Thematischen befasst sich die AG-VT mit:

- der Bereitstellung klimafreundlicher Energieträger (Methan, Wasserstoff, Wasserstoff-Derivate, Biomethan)
- der CO₂-Verfahrenstechnik (Abtrennung, Aufbereitung, Transport, CCU und CCS)

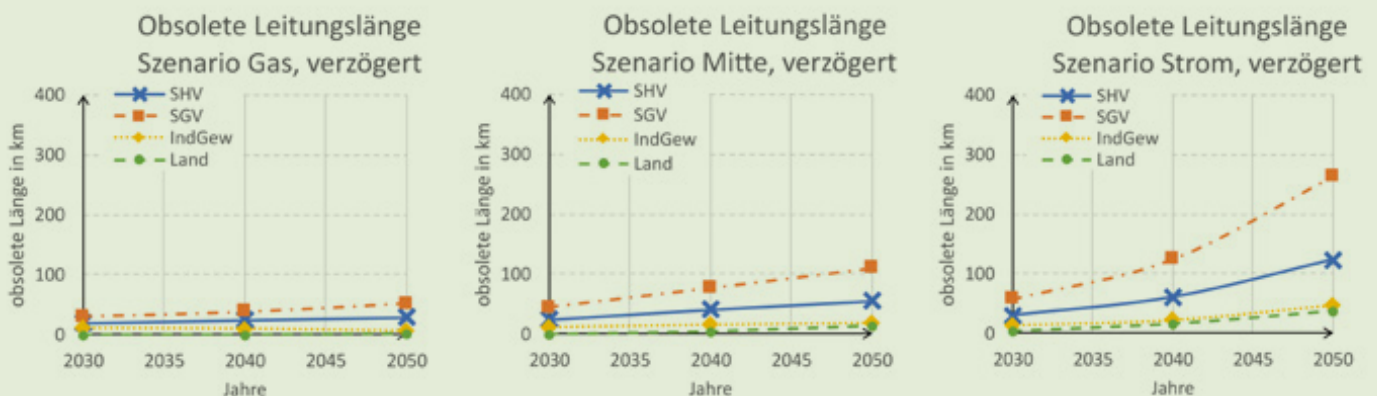


Bild 1.21: Obsolete Leitungslängen je Quartierkategorie und Szenario über Zeit bei örtlich willkürlichem Heizungstechnologiewechsel;

Gesamtlänge Gasnetz: 715 km

SHV: Quartier städtisch gering verdichtet (weniger Einwohner pro Fläche als SGV)

SGV: Quartier städtisch hochverdichtet

Ind/Gew: Industrielles Quartier

Land: ländlich geprägtes Quartier

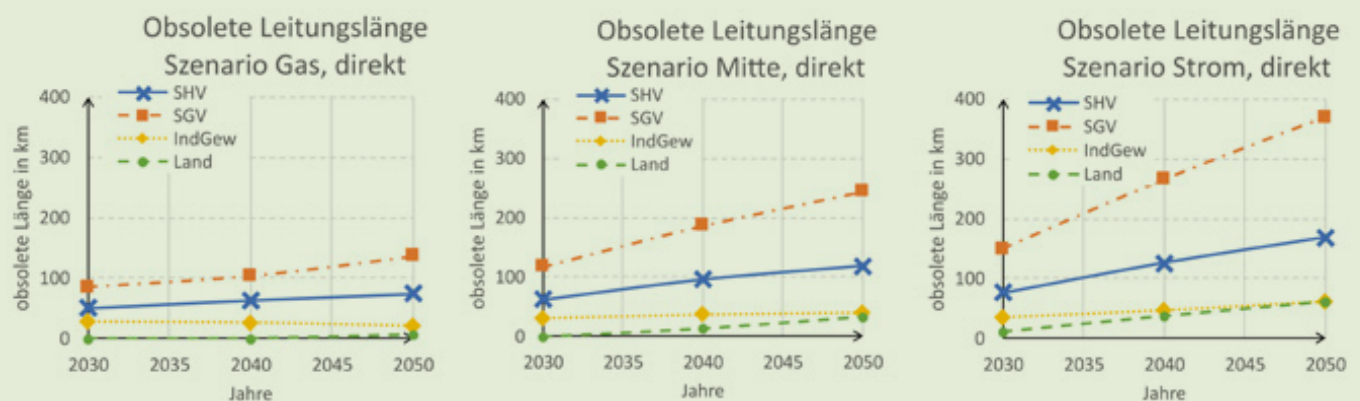


Bild 1.22: Obsolete Leitungslängen je Quartierkategorie und Szenario über Zeit bei örtlich konzentriertem Heizungstechnologiewechsel;

Gesamtlänge Gasnetz: 715 km

SHV: Quartier städtisch gering verdichtet (weniger Einwohner pro Fläche als SGV)

SGV: Quartier städtisch hochverdichtet

Ind/Gew: Industrielles Quartier

Land: ländlich geprägtes Quartier

- der Verfahrenstechnik im Bereich Gastransport und -Anwendung (z. B. adsorptive Aufbereitung).

Die Arbeiten umfassen sowohl experimentelle Arbeit vom Labormaß- 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.

TransHyDE LNG2Hydrogen: Erarbeitung einer wissenschaftlich fundierten, nachhaltigen Datenbasis und Empfehlung als Entscheidungsbasis für die zukunftsfähige und langfristige Nutzung von LNG-Terminal-Standorten als logistische Knotenpunkte für Wasserstoff und dessen Derivate (BMBF)

In dem Verbund LNG2Hydrogen des BMBF-geförderten Wasserstoffleitprojektes TransHyDE wurde die Weiternutzung landbasierter LNG-Terminals zum Import von Wasserstoff und seinen Derivaten untersucht. In diesem Rahmen wurden verfahrenstechnische Konzepte der Importterminals für die Trans-

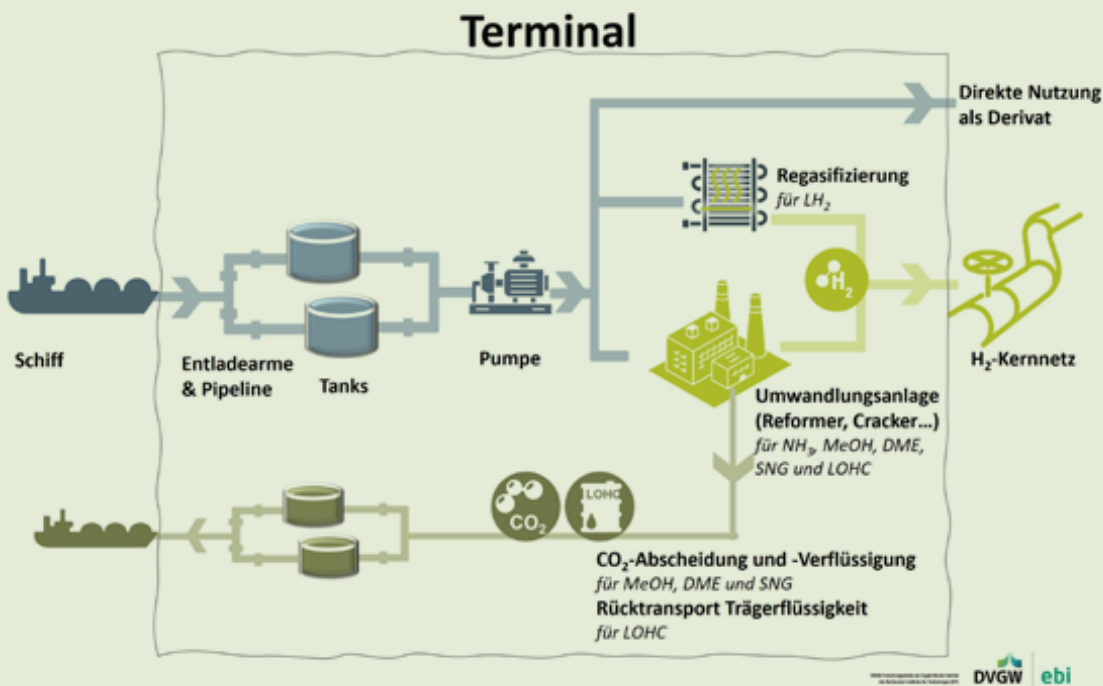


Bild 1.23: Systemgrenzen der betrachteten Terminalkonzepte in LNG2Hydrogen

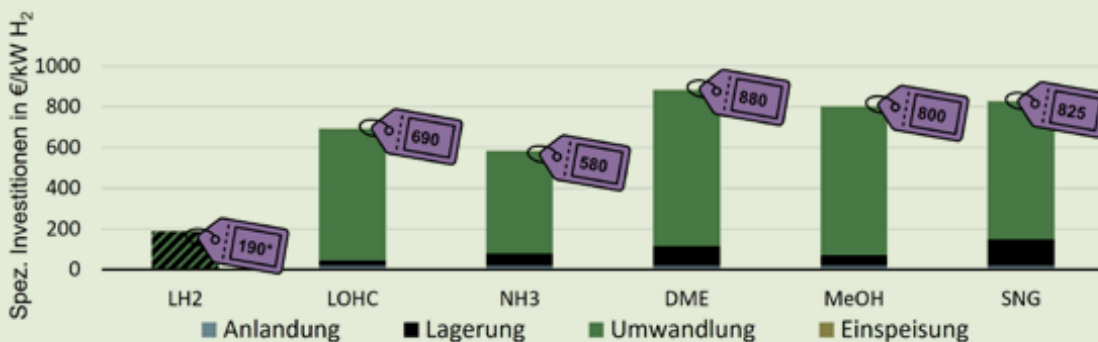


Bild 1.24: Spezifische Investitionen der Terminalkonzepte zum Import von Wasserstoff über Transportvektoren in dem Projekt LNG2Hydrogen.

portvektoren flüssig Wasserstoff (LH₂), Ammoniak (NH₃), flüssige Wasserstoffträger (LOHC), synthetisches Methan (SNG), Methanol (MeOH) und Dimethylether (DME) erstellt und bewertet. Die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik leitete und koordinierte diese Arbeiten zu den Konzepten und erstellte, in engem Austausch mit Partnern aus der Industrie, das Terminalkonzept für den Importvektor SNG. **Bild 1.23** zeigt die betrachteten Systemgrenzen zur Auslegung der Terminalkonzepte.

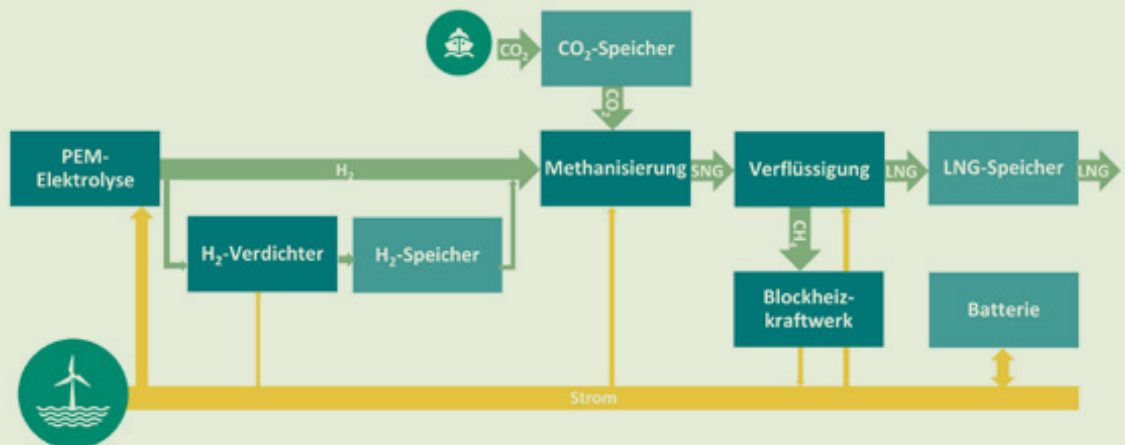
Basierend auf einem zuvor definierten Lastenheft wurden die notwendigen verfahrenstechnischen Schritte definiert, um 100 TWh Wasserstoff pro Jahr an einem Terminal bereitzustellen. Die Energie von 100 TWh/a Wasserstoff entspricht der Energiemenge von rund 10 Mrd. m³/a Methan, welche an geplanten, konventionellen landbasierten LNG-Terminals, wie Brunsbüttel, zukünftig bereitgestellt werden soll. Es wurden in einem ersten Schritt Prozessfließbilder erstellt. Von diesen ausgehend wurden Aspen Simulationen der Prozesskette

durchgeführt. So konnten Massen- und Energiebilanzen für das Terminal erstellt und der energetische Ausnutzungsgrad des Terminals ermittelt werden. Der Flächenbedarf des Terminals wurde zudem bestimmt. Ausgehend von der benötigten Menge an Transportvektor und der anfallenden CO₂-Menge wurden außerdem die für die Anlandung der verschiedenen Energievektoren und für den Rücktransport von CO₂, im Falle der kohlenstoffbasierten Derivate, benötigten Schiffe pro Woche abgeschätzt.

Auf Basis der Fließbilder und der Simulationen wurde ausgehend von den Hauptkomponenten der Anlage eine Investitionskostenschätzung mit der Faktorenmethode durchgeführt. Die spezifischen Investitionen für das Terminalkonzepte SNG belaufen sich auf rund 800 €/kW Wasserstoff (**Bild 1.24**).

Der größte Anteil der Investitionen entfällt bei den Wasserstoffderivaten auf die Umwandlungsanlagen. Diese machen rund 80-95 % der Investitionen aus.

Bild 1.25:
Blockfließbild
der Offshore
LNG-Prozess-
kette



Das in diesem Projekt erlangte Detailwissen zu den Konzepten der Importterminals der Transportvektoren wird aktuell in dem DVGW-Projekt E-IMPORT angewendet und vertieft. Dort werden die Terminalkonzepte für NH_3 , DME und MeOH am Importhafen detailliert betrachtet und die DVGW-Importstudien aktualisiert.

H2Mare PtX-Wind: Auslegung einer stationären Methanisierungs-Prozesskette

Im Verbund PtX-Wind des Wasserstoffleitprojektes H2Mare (gefördert vom BMBF) wird von der AG VT die Herstellung von grünem LNG auf einer Offshore Plattform untersucht. Hierbei wird die Plattform als Insellösung mit direkter Kopplung an einen Offshore Windpark und ohne einen landseitigen Netzananschluss konzipiert. Aufgrund des Standortes auf einer Offshore Plattform sind die Anlagen besonderen klimatischen Herausforderungen ausgesetzt. Durch den Kontakt der Anlagen mit Meerwasser und der Hochseeluft werden z. B. hohe Anforderungen an den Korrosionsschutz gestellt. Eine besondere Anforderung stellt das Emissionsmanagement auf hoher See dar. Hierzu gehört zum Beispiel das Einleiten der Sole aus der Meerwasseraufbereitungsanlage für die Elektrolyse. Das Ziel des Projekts ist die Machbarkeit aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht zu bewerten.

Um den Einfluss des fluktuierenden Lastprofils der Windkraftanlagen auf den Betrieb der PtX-Anlagen zu untersuchen, wurde die Prozesskette (Bild 1.25) in einem stationären Simulationsmodell abgebildet und simuliert. Für die Wasserstoffherstellung wird eine 100-MW-PEM-Elektrolyse angenommen. Der produzierte Wasserstoff wird entweder direkt einer Wabenmethanisierung zugeführt oder verdichtet und in einem Wasserstofftank gespeichert. Das Synthetic Natural Gas (SNG) wird anschließend in einer zweistufigen Stirlingverflüssigung verflüssigt. Neben den PtX-Anlagen werden Edukt- und Produktspeicher auf der Plattform benötigt. Es wird angenommen, dass das flüssige CO_2 und das LNG per Schiff zur Plattform bzw. an Land transportiert werden.

Da auf der Plattform keine Netzanbindung vorhanden ist, werden eine Batterie und ein Blockheizkraftwerk (CHP) für die Eigenversorgung mit elektrischer Energie installiert. Zum einen können sehr große Schwankungen des Windlastprofils mithilfe der Batterie abgepuffert werden, zum anderen kann der minimale Strombedarf der Plattform über das CHP und die Batterie bei Windflauten gedeckt werden. Gleichzeitig muss eine Notstromversorgung unabhängig vom Wind gewährleistet sein. Mithilfe des Modells kann eine Optimierung der Anlagendimensionierung in Bezug auf hohe LNG-Ausbeute und geringen Gesteungskosten gefunden werden. Durch eine Überbauung des Windparks von etwa 30 % im Vergleich zur Elektrolysekapazität können die Volllaststunden der Elektrolyse erhöht werden. Hierdurch kann eine hohe LNG-Ausbeute von 19,8 kt/a bei gleichzeitiger Nutzung von 89 % der elektrischen Energie, die der Windpark im Jahr produziert. Jedoch kann durch die Überbauung nicht die maximale Leistung des Windparks abgenommen werden, weshalb es zu Abschaltungen (11 %) kommt.

Die Arbeiten über die Auslegung von PtX-Prozessen für ein Inselsystem wird in einem neuen DVGW Projekt E-Import (G 202438) weitergeführt. Es ist geplant, die Auslegung der Prozessketten zu verallgemeinern und so auf unterschiedliche Inselsysteme anwenden zu können. Dadurch können weltweite Standorte untersucht und die Prozessketten einfacher auf dortige Energiesysteme angepasst werden.

Zukunftsoption für Biogasanlagen: Einspeisung und Verflüssigung von Biomethan

Viele der rund 9.500 Biogasanlagen in Deutschland, an denen das erzeugte Biogas bisher direkt verstromt wird, sind für den wirtschaftlichen Betrieb einer Aufbereitungs- und Einspeiseanlage zu klein. Eine Zukunftsoption ist daher der Zusammenschluss von in räumlicher Nähe liegender Biogasanlagen zu einem Biogasanlagencluster, um den Weiterbetrieb der Biogasanlagen nach Auslaufen der EEG-Förderung zu ermöglichen und das Biomethan wirtschaftlich in das deutsche Gas-

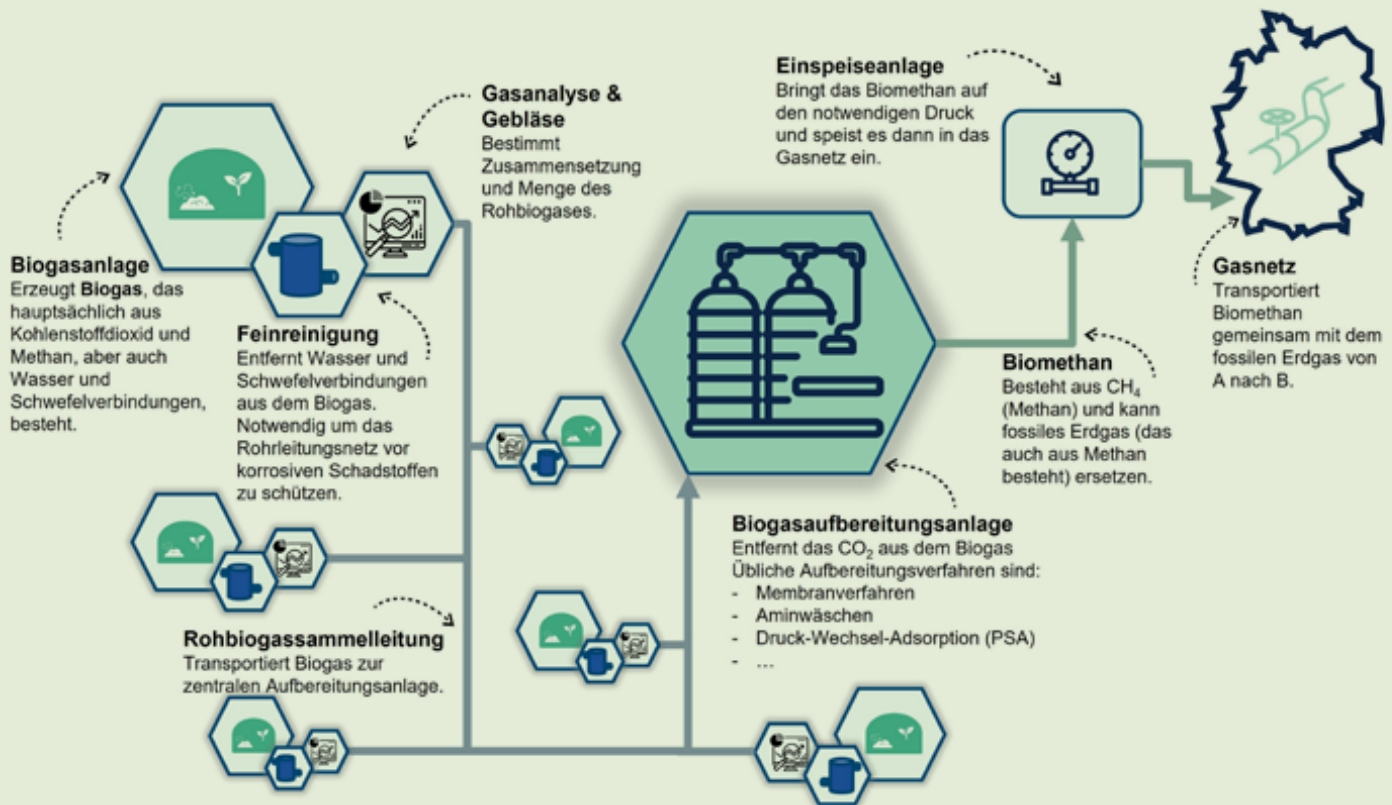


Bild 1.26: Aufbau eines Biogasanlagenclusters.

netz einzuspeisen. Der Aufbau eines Biogasanlagenclusters ist in Bild 1.26 schematisch dargestellt. Im FNR-Projekt BGA-Cluster wurden drei potenzielle Anlagencluster in Deutschland analysiert und ein Cluster im Detail projektiert. Hierzu wurden technische und regulatorische Fragestellungen rund um die Clusterung von Biogasanlagen untersucht und eine techno-ökonomische Bewertung durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Clusterung für einen einzelnen Biogasanlagenbetreiber eine Reduktion der Investitionen von rund 50 % im Vergleich zur Einzeleinspeisung mit sich bringt.

Doch nicht nur bei den Biogasanlagenbetreibern werden Kosten gespart, auch für den Gasnetzbetreiber fallen signifikant niedrigere Investitionen an, da durch die Clusterung die Anzahl an geplanten und gebauten Einspeiseanlagen stark reduziert wird und weniger Einspeisebegehren gestellt werden.

Eine weitere Zukunftsoption neben der Clusterung von Biogasanlagen ist die Aufbereitung von Biogas und anschließende Verflüssigung des Biomethans zu bioLNG. Im Projekt probioLNG (gefördert vom BMBF) wurden für diesen Nutzungspfad eine Demonstrationsanlage errichtet, um innovative Verfahren wie die Zweistufige-Druckfermentation und die Biogasaufbereitung mit ionischen Flüssigkeiten zu demonstrieren. Im Sommer 2024 wurden die von der AG-VT



Bild 1.27: Demo-Anlagen der AG-Verfahrenstechnik am Energy Lab des KIT

im Projekt probioLNG neu errichteten Demonstrationsanlagen Demo-IL und Demo-LNG gekoppelt betrieben. Vorge-trocknetes und entschwefeltes Gas aus der Forschungsbiogasanlage der Universität Hohenheim wurde durch die CO₂-Ab-

trennung mit ionischen Flüssigkeiten aufbereitet. Eine in die Anlage integrierte Feinreinigung trennt mit mehreren Feststoffadsorbentien restliche Spuren von CO₂ und Wasser bis auf wenige ppm ab. Das hochreine Methan kann anschließend zur Stirling-Verflüssigung weitergeleitet werden. Dort wird es bei bis zu -162 °C zu bioLNG verflüssigt und kann vor Ort in LNG-Fahrzeuge getankt werden.

Nach einer weiteren Versuchskampagne wurden die Anlagen Ende 2024 zum Energy Lab des KIT am Campus Nord transportiert (Bild 1.27). Dort werden sie aktuell in die Infrastruktur integriert und mit der katalytischen Methanisierung verschaltet. Diese Prozesskette mit allen drei Demonstrationsanlagen der Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik werden im Rahmen des Projektes H2Mare (siehe oben) für die Offshore-Produktion von LNG untersucht.

1.6.3. Arbeitsgruppe „Materialprüfung“

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

Die Prüfdienstleistungen des akkreditierten Materialprüflabors für Dichtungs- und Korrosionsschutzmaterialien sowie für Hilfsstoffe wie Dichtstoffe, Schmierstoffe, Lecksuch- und Odoriermittel erfreuen sich weiterhin einer hohen Nachfrage.

Neben Erdgas rücken zunehmend Energieträger in den Fokus, die im Zuge der Energiewende verstärkt eingesetzt werden sollen. Zu nennen sind insbesondere Wasserstoff und DME aus erneuerbaren Quellen. Die in den Forschungsprojekten

- F&E für H₂ – Forschung und Entwicklung als Grundlage für den Einsatz von Wasserstoff in der Gasversorgung und der Umsetzung in Prüfgrundlagen (DVGW-Innovationsprogramm Wasserstoff – G 202021) – abgeschlossen
- H₂ & Werkstoffe (HydEKuS) – Ermittlung von wissenschaftlichen Grundlagen für Wasserstoffanwendungen von Elastomeren, Kunststoffen, Schmier- und Dichtmitteln in der Gasinfrastruktur (DVGW-Innovationsprogramms Wasserstoff - G 202208) – laufend
- Erneuerbarer Dimethylether (rDME) - rDME im Flüssiggasmarkt – Integration von erneuerbarem Dimethylether ins technische Regelwerk (G 202411) – laufend

von den ermittelten Grundlagen und davon abgeleiteten Prüfverfahren für Materialien finden bereits in diversen Zerti-

fizierungsprogrammen (ZP) der DVGW CERT GmbH gemäß **Tabelle 1.0** Anwendung. Neben Zertifizierungsprogrammen zur Bewertung der H₂-Eignung, wurde auch die Prüfmethode zur Charakterisierung von Elastomeren in Kontakt mit Dimethylether (DME) in einem Zertifizierungsprogramm verankert.

Die DVGW CERT GmbH schafft so für Zertifikatinhaber einen Mehrwert durch die Erweiterung bestehender Basis-Zertifikate um weitere spezifische Merkmale. Darüber hinaus dienen die Zertifizierungsprogramme als Brücke zur Normung. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen und Prüfungen bilden eine breite Datenbasis zur Fortschreibung und Ergänzung der entsprechenden Normen auf europäischer und internationaler Ebene.

Die Erweiterung des Produktportfolios geht einher mit dem beständigen Ausbau der Prüfkapazitäten. Im Rahmen des Forschungsprojekts HydEKuS wurde der Einfluss von Flachdichtungswerkstoffen auf die Dichtheit von Flanschverbindungen bei H₂-Anwendungen untersucht. Ziel hierbei war es, das grundsätzliche Verhalten von verschiedenen Werkstoffen zu untersuchen und eine geeignete Prüfgrundlage in Form eines Zertifizierungsprogramms zu entwickeln, das als Grundlage für die Fortschreibung der DIN 3535-6 dienen soll. An einem Laborprüfstand wurden Werkstoffe auf Basis synthetischer Fasern (FA), Graphit (GR) sowie PTFE (TF) nach bzw. in Anlehnung an DIN 3535-6 mit den Prüfgasen Stickstoff, Wasserstoff und Methan untersucht (Bild 1.28 a und b).

Wie in Bild 1.29 dargestellt, ist die volumenbezogene spezifische Leckagerate mit Wasserstoff deutlich höher, als mit Stickstoff bzw. Methan.

Bild 1.30 zeigt die gemessenen Spannen und das arithmetische Mittel von spezifischen Leckageraten aus verschiedenen Werkstoffen der entsprechenden Familie an. Die Datenbasis ist noch gering, daher ist die Aussagekraft eingeschränkt. Man kann erkennen, dass eine individuelle Prüfung wichtige Informationen als spezifischen Materialkennwert ergibt.

Für schaubildende Lösungen zur Lecksuche, die bereits nach DIN EN 14291 eine DIN-DVGW Zertifizierung erhalten haben, definiert das ZP 5170 als zusätzliches qualitatives Merkmal die Gegenüberstellung der Blasenbildung bei Kontakt mit Wasserstoff, Stickstoff bzw. Methan sowie ggf. weiteren Prüfgasen. Die Eignung der verschiedenen Prüfgase wird nachgewiesen, wie in Bild 1.31 dargestellt.

Tabelle 1.0: Zertifizierungsprogramme (Auszug)

ZP	Titel	Projekt
5101	Verträglichkeit und Permeationseigenschaften von Elastomerwerkstoffen für Dichtungen u. Membranen in Gasgeräten u. -anlagen gegenüber Wasserstoff für einen Gehalt von bis zu 100 Vol. % H ₂	F&E für H ₂
5102	Ergänzungsprüfungen von Elastomer-Werkstoffen für Dichtungen u. Membranen in Gasgeräten u. -anlagen in Kontakt mit (erneuerbarem) Dimethylether	rDME
5123	Ergänzungsprüfungen für Flachdichtungswerkstoffe gegenüber einem Wasserstoffgehalt von bis zu 100 Vol.-%	HydEKuS
5170	Ergänzungsprüfungen für schaubildende Lösungen zur Lecksuche gegenüber einem Wasserstoffgehalt von bis zu 100 Vol.-%	EBI intern



Bild 1.28: a) Genormte Prüfkörper; b) Flachdichtungsprüfstand, Quelle: EBI

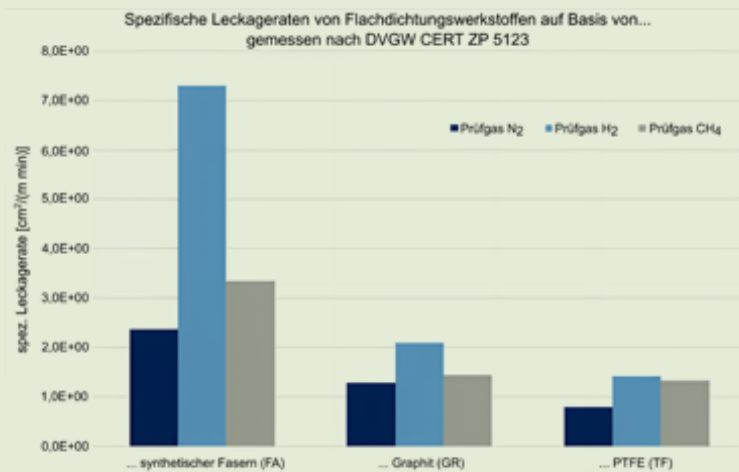


Bild 1.29: Volumenbezogene spezifische Leckageraten für unterschiedliche Werkstofftypen

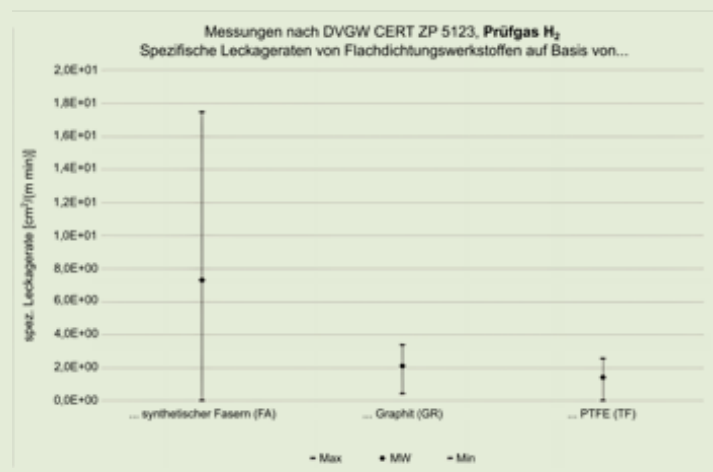


Bild 1.30: Volumenbezogene spezifische Leckageraten für Werkstofffamilien

Weitere Zertifizierungsprogramme sind in Vorbereitung, beispielsweise das ZP Rapid Gas Decompression (RGD) zur Bewertung einer möglichen Schädigung von Elastomeren bei schneller Druckentspannung in Gastransportleitungen.

Die Vernetzung in Gremien zur Gestaltung und Fortschreibung von Normen und Regelwerken ist von essentieller Bedeutung. In mitarbeitenden und auch leitenden Funktionen sind unsere 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 H₂-Normung wird durch die BMWK-geförderte Normungsroadmap „Wasserstofftechnologien – Unterstützung des Markthochlaufs von Wasserstoff in Deutschland“, in der

wir in der AG Bauteile für Anwendung und Technologien agieren, priorisiert und forciert, Die Weiterführung erfolgt über CEN-CLC/COG Hydrogen „CEN-CENELEC Coordination Group on Hydrogen“ als europäisches Koordinierungsgremium, in dem die Expertise der Arbeitsgruppe eingebracht wird.

Durch ZP 5100 - zur Konformitätsbewertung von Elastomerwerkstoffen für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten und -anlagen nach DIN EN 549:2019+A1:2023+A2:2024 ist es gelungen, die Anforderungen an die Konformitätsbewertung von Elastomerwerkstoffen für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten und Gasanlagen festzulegen. Die Zertifizierung, Rezertifizierung und Überwachung eines Elastomerwerkstoffs nach DIN EN 549 durch die DVGW CERT GmbH erfolgt nur, wenn die in diesem Dokument beschriebenen Prüfungen durchgeführt wurden und die entsprechenden Anforderungen der Norm erfüllt sind.

Bild 1.31: Beispiel Schaumbild gasartenabhängig



Diese Vorgehensweise soll als Blaupause für alle Materialien/Produkte im Zuständigkeitsbereich der Materialprüfung dienen.

Normung

Neben dem Convenorship des CEN/TC 208/WG 4 Dichtungen und Membranen für Gasgeräte und Gasanlagen hat Andreas Strauß im März 2024 auch das Convenorship der CEN/TC 208/WG1 Dichtungen aus Elastomeren für Warm- und Kaltwasser und Abwasser übernommen. Im Rahmen der Regelwerksarbeit stand die Überarbeitung von Regelwerksdokumenten sowie national und international geltenden Normen im Vordergrund:

- **DIN EN 549 + A3** „Elastomer-Werkstoffe für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten und Gasanlagen“ soll um informative Anhänge für H_2 und (r)DME erweitert werden. Die Entwurfsveröffentlichung verzögert sich weiter und wird erst in 2025 erfolgen. Daher hat DVGW CERT die Inhalte als ZP 5102 für (r)DME und ZP 5101 H_2 -Permeabilität veröffentlicht.
- **DVGW-Information GAS/WASSER Nr. 27** Korrosionsschutz - Überblick Merkmale und Prüfmethode von Werks- und Nachumhüllungen (August 2024); seit 2021 jährliche Veröffentlichung der bisher bearbeiteten Prüfungen. Die Inhalte werden zukünftig auch als DIN 30360 geführt, deren Bearbeitung in 2025 starten wird. Diverse Prüfmethode werden bereits als Textbausteine in verschiedene Normungsvorhaben eingebracht.
- **DVGW CERT ZP 5123** „Ergänzungsprüfungen für Flachdichtungswerkstoffe gegenüber einem Wasserstoffgehalt von bis zu 100 Vol.-%“ wurde gemeinsam mit der DVGW CERT erarbeitet und veröffentlicht 2024-04
- **DVGW CERT ZP 5100** zur Konformitätsbewertung von Elastomerwerkstoffen für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten u. -anlagen nach DIN EN 549:2019+A1:2023+A2:2024 wurde veröffentlicht 2024-09
- **DVGW CERT ZP 5170** Ergänzungsprüfungen für schaumbildende Lösungen zur Lecksuche gegenüber einem Wasserstoffgehalt von bis zu 100 Vol.-% wurde veröffentlicht 2024-08

- **DVGW CERT ZP 5102** Ergänzungsprüfungen von Elastomer-Werkstoffen für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten u. -anlagen in Kontakt mit (erneuerbarem) Dimethylether wurde veröffentlicht 2025-01.
- **DVGW CERT ZP 5242** zur Konformitätsbewertung von Dichtmittel für metallene Gewindeverbindungen in der Trinkwasser-Installation nach DIN 30660 ist in Vorbereitung.

1.6.4. Arbeitsgruppe „Brennstofflabor“

Jochen Schütz, Kerstin Kröger, Stephan Seidelt, Cathérine Notar, Niklas Holschuh, Patrick Gruschka

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

Die Arbeitsgruppe beschäftigte sich 2024 insbesondere mit der Vertiefung der Expertise im Themenkomplex Wasserstoff. Hierzu zählen die vollumfängliche Analytik der Gasbeschaffenheit, die Bestimmung von Gasbegleit- und Spurenstoffen und verschiedene Probenahmemethoden.

Im Bereich Methodenentwicklung arbeitet die Arbeitsgruppe Brennstofflabor ständig an der Etablierung und Weiterentwicklung von Messmethoden und Probenahmeverfahren. So konnte 2024 eine neue Apparatur zur Beprobung von Wasserstoffinfrastrukturen (Transportnetze, Elektrolyseure, Industrieanlagen) fertiggestellt werden. Damit ist es möglich, Gasproben für die anschließenden Laboranalysen bereitzustellen. **Bild 1.32** zeigt eine ebenfalls neue Probenahmeapparatur, mit der es möglich ist, LNG-Tankstellen zu beproben. Hierbei wird innerhalb eines realen Betankungsvorgangs eine LNG-Probe aus der tiefkalten Flüssigphase entnommen.

Darüber hinaus wurde ein neues Gaschromatographie-System konzipiert und angeschafft, mit welchem die

Gasbeschaffenheiten von Erdgas, Biomethan und Wasserstoff der Gruppe A vollumfänglich analysiert werden kann. Zusätzlich können einzelne Spurenstoffe der Gruppe D quantitativ bestimmt werden.

Im Rahmen des Wasserstoffleitprojekts Get H₂ TransHyDE (BMBF) waren die Weiterentwicklung des Wasserstofflabors und die Validierung von Analysemethoden weiterhin die Hauptaufgaben in 2024. Neben der Gasbeschaffenheitsanalytik von Gasproben dient der Messaufbau auch der Bestimmung des Durchbruchverhaltens von Spurenstoffen und Verunreinigungen bei der adsorptiven Wasserstoffreinigung. Hierzu wurden zusammen mit der Arbeitsgruppe „Verfahrenstechnik“ zahlreiche Versuche zur Entfernung von Sauerstoff und Ammoniak in Wasserstoff erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen. Weiterhin wurde an der Erstellung eines verbundübergreifenden Whitepapers zum Thema Gasanalytik gearbeitet.

Innerhalb des Forschungsprojekts RingWaBe (BMDV) lag der Fokus hauptsächlich auf der Methodenentwicklung zur Analyse von Wasserstoff der Gruppe D. Darüber hinaus wurden erste Analysen des zentralen Ringversuchs durchgeführt und die Validierung der Messmethode für die Analyten CO, CO₂ und CH₄ vorangetrieben. Ebenso wurden zwei Probenahmekampagnen an Wasserstofftankstellen durchgeführt, um die Probenahme-prozedur ebenfalls zu validieren. Weitere Schritte sehen die Validierung weiterer Analyten und die Vorbereitung von Probenahmebehältern vor.

Neben der Gasbeschaffenheit, Analytik und Probenahme, beschäftigte sich die Arbeitsgruppe auch weiterhin mit sicherheitstechnischen Aspekten bei der netzgebundenen Gasverteilung in der öffentlichen Versorgung. Im Bereich der Odorierung wurde das neue DVGW-Forschungsprojekt G202416 „H₂-Odor II“ gestartet. Als Folgeprojekt von „H₂-Odor“, adressiert es neuartige und potenzielle Odoriermittel zur Verwendung mit Wasserstoff. Der Fokus liegt sei-

tens der Arbeitsgruppe Brennstofflabor auf der Durchführung olfaktorischer Untersuchungen, wie z. B. der K-Wert Bestimmung, aber auch auf der Methodenentwicklung zur analytischen Bestimmung der Odoriermittelkonzentrationen der betrachteten Substanzen.

Des Weiteren wurden im Rahmen der betrieblichen Forschung, verschiedene DVGW-Forschungsprojekte bearbeitet. Exemplarisch ist hier „H₂-Betrieb – Betriebliche- und Sicherheitsaspekte bei 100 %-H₂-umgestellten Gasnetzen < 16 bar“ (G202413) zu nennen.

Im Bereich Methanemissionen wurde in 2024 das DVGW-Forschungsprojekt „FaMeGQ – Fahrzeugunterstützte Messtechnik zur oberirdischen Überprüfung von erdverlegten Gasleitungen und Quantifizierung der Methanemissionen“ vorbereitet, eingereicht und startet zum 01.01.2025.

Folgendes DVGW-Forschungsprojekt wurde in 2024 erfolgreich abgeschlossen:

„UmSiAG – Umwelt- und sicherheitsrelevante Aspekte in der Gasverteilung: Bewertung der Überwachungs-, Überprüfungs- und Reparaturintervalle zur Umsetzung der EU-Verordnung zur Verringerung der Methanemissionen im Energiesektor und Vorschläge für neue Überprüfungs- und Reparaturintervalle im Arbeitsblatt G 465-1 (A) und Merkblatt G 465-3 (M)“

1.6.5. Veranstaltungen

Gaskursus 2024

Vom 08.-12.04.2024 fand der Gaskursus wieder in Karlsruhe statt. 56 Personen haben an den 21 Vorträgen der Veranstaltung teilgenommen. In gewohnter Weise wurde durch das Grundwissen der Gasversorgung bis hin zu den aktuellen Fragestellungen und Innovationsthemen der Gaswirtschaft geführt.



Bild 1.32: Mobiler LNG-Sampler zur Beprobung von LNG-Tankstellen

65. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches 2024

Mit großzügiger Unterstützung durch die Ontras Gastransport GmbH und die DBI-Gruppe wurde der 65. Erfahrungsaustausch vom 04.-06.09.2024 in Leipzig ausgerichtet. Die interessanten Fachbeiträge zur Rolle des Gases bei der Energiewende und aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten wurden einem Teilnehmerkreis von insgesamt 74 Personen präsentiert.

Im Anschluss an die Vorträge folgte eine Stadtrundfahrt mit Besichtigung des Völkerschlacht-Denkmals und ein Stadtrundgang, bevor sich die Chemiker und Ingenieure beim Abendessen im Auerbachs Keller fachlich austauschten.

Festkolloquium zum 10-jährigen Jubiläum der Forschungspartnerschaft Karlsruhe Energie

Mit einem Festkolloquium wurde das zehnjährigen Bestehen der Forschungspartnerschaft Karlsruhe Energie am Engler-Bunte-Institut am 13.11.2024 gewürdigt. Die erste Bürgermeisterin der Stadt Karlsruhe, Frau Gabriele Luczak-Schwarz, stellte in ihrem Grußwort die Bedeutung der Initiative für die Stadt Karlsruhe hervor. Des Weiteren informierte Frau Prof. Dr. Kora Kristof, die Vizepräsidentin für Digitalisierung und Nachhaltigkeit des KIT über die Vorhaben und Projekte des KIT zum Erreichen der Klimaziele. Herr Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl von der FAU Erlangen-Nürnberg trug in seinem Festvortrag zur Energiewende in Europa und zur Rolle der Energieträger Strom und Gas vor. Im Anschluss ließen die Partner 10 Jahre Forschungspartnerschaft Revue passieren und gaben einen Ausblick auf zukünftige Tätigkeitsschwerpunkte.

Im Jahr 2014 war die Initiative von den Partnern Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Stadtwerke Karlsruhe GmbH (SWK), Stadtwerke Karlsruhe Netzservice GmbH (SWKN) und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (DVGW-EBI) gegründet worden, um ihre langjährige Zusammenarbeit auf dem Gebiet der nachhaltigen Energieversorgung weiter zu intensivieren und stärker zu vernetzen. In den zehn Jahren des Bestehens wurden zahlreiche Forschungsprojekte, Workshops und Vortragsveranstaltungen durchgeführt.

1.7. Veröffentlichungen im Jahr 2024 – EBI ceb und DVGW gt

Zeitschriftenaufsatz

- Asbahr, W.; Lamparter, R.; Rauch, R.: A Cold Flow Model of Interconnected Slurry Bubble Columns for Sorption-Enhanced Fischer-Tropsch Synthesis. In: ChemEngineering 8 (3), S. 52. DOI: 10.3390/chemengineering8030052.
- Bär, K.; Staudt, C.; Mörs, F.; Graf, F.: Zusammenschluss von Biogasanlagen – Clusterung als Zukunft für Biogas. In: gwf - Gas+Energie.
- Dammann, M.; Santo, U.; Böning, D.; Knoch, H.; Eberhard, M.; Kolb, T.: Entrained flow gasification: Pilot-scale experimental, balancing and equilibrium data for model validation. In: Fuel 382, S. 132809. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132809.

Dammann, M.; Walker, S.; Mancini, M.; Kolb, T.: Devolatilisation of beech wood char: Kinetics from thermogravimetric analyses and drop-tube reactor experiments. In: Fuel 375, S. 131967. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131967.

Dammann, M.; Weber, R.; Fateev, A.; Clausen, S.; Alberti, M.; Kolb, T.; Mancini, M.: Thermal radiation at high-temperature and high-pressure conditions: Validation of HITEMP-2010 for carbon dioxide. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, S. 109121. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2024.109121.

E-Moghaddam, M.; Dahmen, N.; Santo, U.; Sauer, J.: Gasoline Synthesis from Biomass-Derived Syngas Comparing Different Methanol and Dimethyl Ether Pathways by Process Simulation, Based on the Bioliq Process. In: Energy & Fuels 9. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c04524.

Fedorov, A.; Graefe, P. A.; Perehodjuk, A.; Rauch, R.; Wohlrab, S.; Linke, D.: Development of Fe-based catalysts for CO₂ hydrogenation to higher hydrocarbons for operating in slurry reactor. In: Applied Catalysis A: General 680, S. 119749. DOI: 10.1016/j.apcata.2024.119749.

Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Rauch, R.; Stein, O.; Wolf, M.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2023 Engler-Bunte-Institut des KIT, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe. In: gwf - Gas+Energie 165 (06+07-08/2024). Online verfügbar unter <https://gwf-gas.de/produkt/engler-bunte-institut-des-karlsruher-instituts-fuer-technologie-kit-im-jahr2023/>.

Kussin, P.; Stegmaier, T.; Müller, C.; Mörs, F.; Graf, F.: Ein neues Konzept zur CO₂-Bereitstellung aus Luft als Gaswäsche mit ionischen Flüssigkeiten. In: Chemie Ingenieur Technik, Artikel cite.202300140. DOI: 10.1002/cite.202300140.

Rauch, R.; Kiros, Y.; Engvall, K.; Kantarelis, E.; Brito, P.; Nobre, C. et al.: Hydrogen from Waste Gasification. In: Hydrogen (5), S. 70–101. DOI: 10.3390/hydrogen5010006.

Mokashi, M.; Shirsath, A.B.; Celik, A.; Lott, P.; Müller, H.; Tischer, S.; Maier, L.; Bode, J.; Schlereth, D.; Flick, D.; Bender, M.; Ehrhardt, K.; Deutschmann, O.; Scheiff, F.: Methane pyrolysis in packed bed reactors: Kinetic modeling, numerical simulations, and experimental insights. In: Chemical Engineering Journal (485), S. 149684. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149684.

Staudt, C.; Hofsäßl, C.; Lewinski, B. von; Mörs, F.; Prabhakaran, P.; Bajohr, S. et al.: Process Engineering Analysis of Transport Options for Green Hydrogen and Green Hydrogen Derivatives. In: Energy Tech 4, S. 2256. DOI: 10.1002/ente.202301526.

Walker, S.; Kolb, T.: Operation of a differential fixed bed reactor for investigations on micro-kinetics of heterogeneous gasification reactions. In: Fuel 381, S. 133561. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133561.

Strauch, D.; Weiner, P.; Sarma, B. B.; Körner, A.; Herzinger, E.; Wolf, P.; Zimina, A.; Hutzler, A.; Doronkin, D. E.; Grunwaldt, J.-D.; Wasserscheid, P.; Wolf, M.: Bimetallic platinum rhenium catalyst for efficient low temperature dehydrogenation of perhydro benzyltoluene; Catalysis Science & Technology, 14 (7), 1775–1790; DOI: 10.1039/D3CY01336G.

Mahayni, Y.; Maurer, L.; Auer, F.; Hutzler, A.; Wasserscheid, P.; Wolf, M.: Structure sensitivity of the low temperature dehydrogenation of perhydro (di)benzyltoluene on supported platinum nanoparticles; Catalysis Science & Technology, 14 (18), 5464–5473; DOI: 10.1039/D4CY00032C.

Herzinger, E.; Wolf, M.: Perspectives and Potential of Liquid Organic Hydrogen Carriers in the German Energy Scenario; Chemie Ingenieur Technik, 96 (1-2), 65–73; DOI: 10.1002/cite.202300227

Siegert, F.; Gundermann, M.; Maurer, L.; Hahn, S.; Hofmann, J.; Distel, M.; Schühle, J.; Müller, K.; Wolf, M.; Preuster, P.; Auer, F.; Geißelbrecht, M.; Wasserscheid, P.: Autothermal hydrogen release from liquid organic hydrogen carrier systems; International Journal of Hydrogen Energy, 91, 834–842; DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.10.044

Maurer, L. A.; Pham, C. v.; Fritsch, B.; Jeppesen, H. S.; Etter, M.; Hutzler, A.; Neder, R. B.; Wolf, M.; Auer, F.; Thiele, S.; Wasserscheid, P.: Improving Hydrogen Release From Oxygen-Functionalized LOHC Molecules by Ru Addition to Pt/C Catalysts; ChemCatChem, e202400375; DOI: 10.1002/cctc.202400375

Schaffert, Heidbreder, Brede (GWI), Grube, Pietsch (DBI), Mörs, Staudt (DVGW-EBI), Vielversprechende Zukunftsoptionen für Biogas: Ergebnisse des DVGW-Forschungsprojektes „ENEVEG“, ewp, 01/2024

Staudt, Schwarz, Mörs, Wasserstoff – woher, wie viel und wie?, Factsheet DVGW, 01/2024

Staudt, Hofsäb, von Lewinski, Mörs, Prabhakaran, Bajohr, Graf, Kolb, Process Engineering Analysis of Transport Options für Green Hydrogen and Green Hydrogen Derivates, Energy Technology, 03/2024

Bär, Staudt, Mörs, Graf Zusammenschluss von Biogasanlagen – Clusterung als Zukunft für Biogas, gwf Gas + Energie 05/2024

Erlor, F.; Knorr, C.; Wiersig, M.; Strauß, A.; Dr.-Ing. Anghilante, R.; Dr. Dörr, H.; Elhami, O.-H.; Janßen, N.; Dr.-Ing. Burmeister, F.; Kinnen, W.: F&E als Grundlage für den Einsatz von Wasserstoff in der Gasversorgung und der Umsetzung in Prüfgrundlagen - F&E für H₂, Abschlussbericht G 202021

Schuhmann, K.-U.; Stange, H.; Klein, D.; Wiedenhöft, C.; Strauß, A.: Wasserstoff in der häuslichen Anwendung – Standortbestimmung für die zukünftige Gebäudebeheizung (Teil 1), DVGW energie | wasser-praxis, April 2024

Schuhmann, K.-U.; Stange, H.; Klein, D.; Wiedenhöft, C.; Strauß, A.: Wasserstoff in der häuslichen Anwendung – Standortbestimmung für die zukünftige Gebäudebeheizung (Teil 2), DVGW energie | wasser-praxis, Mai 2024

Oberle, S.; Gnann, T.; Wayas, L.; Wietschel, M.: Analyzing the regulatory framework gaps for gas distribution networks with decreasing natural gas demand in Germany; Heliyon 10 e40800, 2024

Kigle, S.; Mohr, S.; Kneiske, T.; Clees, T.; Ebner, M.; Harper, R.; Jahn, M.; Klaassen, B.; Köppel, W.; Ausfelder, F.; Neitz-Regett, A.; Ragwitz, M.: TransHyDE-Sys: An Integrated Systemic Approach for Analyzing and Supporting the Transformation of Energy Systems and Hydrogen Infrastructure Development; Energy Technology 2300828, 2024

Wayas, L.; Jakob, J.; Perau, C.; Husarek, D.; Wasserstoff im Energiesystem -Ergebnisbericht der Arbeitsgruppe Wasserstoff des Forschungsprojektes ENSURE II; gwf Gas+Energie 4 2024

Hochschulschriften

Dammann, M.: Numerical modelling and simulation of atmospheric entrained flow gasification of surrogate fuels. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2024. DOI: 10.5445/IR/1000172116

Hotz, C.: Zweiphasen-Freistrahlmolell eines atmosphärischen Flugstromvergasers

Buch (Sammelwerk)

Kaltschmitt, M.; Hofbauer, H.; Lenz, V. (Hg.): Energie aus Biomasse. Thermo-chemische Konversion. 4. Auflage: Springer Verlag (2), Kap. 6.3.3. Flugstrom-Gaserzeugung (Fleck, S.)

Beiträge / Vorträge

Dr.-Ing. Sebastian Fendt, Chair of Energy Systems, TUM School of Engineering and Design (Hg.) (2024): Book of Abstracts – MH2S 2024. Particle Circulation between Interconnected Slurry Bubble Columns for Sorption-Enhanced Fischer-Tropsch Synthesis. Asbahr, W.; Rauch, R. Munich Hydrogen Symposium 2024. München, 21.-24.10. TUM School of Engineering and Design: Technical University of Munich

Portalegre Polytechnic University (Hg.) (2024): Book of abstracts – Waste to Hydrogen Final Conference. New reactor concept for sorption-enhanced Fischer-Tropsch synthesis. Asbahr, W.; Rauch, R. Unter

Mitarbeit von Paulo Brito, Catarina Nobre, Roberta Panizio, Massimiliano della Pietra, Francesca Santoni. Waste to Hydrogen Final Conference. Portalegre, Portugal, 09.-10.11.2023

Portalegre Polytechnic University (Hg.) (2024): Book of Abstracts - Waste to Hydrogen Final Conference. Effects of co-feeding CO on catalyst activity and selectivity in three-phase CO₂-Fischer-Tropsch synthesis. Graefe, P.A.; Honold, V.B.; Rauch, R. Unter Mitarbeit von Paulo Brito, Catarina Nobre, Roberta Panizio, Massimiliano della Pietra, Francesca Santoni. Waste to Hydrogen Final Conference. Portalegre, Portugal, 09.-10.11.2023

Asbahr, W.; Rauch, R.: Particle circulation in a new reactor concept for sorption-enhanced Fischer-Tropsch synthesis. Munich Hydrogen Symposium 2024. TUM. Dr.-Ing. Sebastian Fendt, Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff. München, 22.10.2024

Becka, R.; Bajohr, S.; Kolb, T.: Methanol synthesis in a spatially resolved profile reactor. International Congress of Chemical and Process Engineering. Czech Society of Chemical Engineering (CHISA). Prag, 27.08.2024. Online verfügbar unter <http://2024.chisa.cz/welcome/>.

Fleck, S.; Haas, M.; Santo, U.; Jakobs, T.; Kolb, T.: Bewertung der Vergasungseigenschaften verschiedener Pyrolyseöle unter Flugstrombedingungen. Jahrestreffen DECHEMA, FG Hochtemperaturtechnik. Dechema. Lindlar, 19.03.2024

Haas, M.; Fleck, S.; Jakobs, T.; Kolb, T.: Liquid Fuel Evaporation under Entrained Flow Gasification Conditions - Insights for Burner Development. 14th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers. Cenertec. Albufeira, Portugal, 02.04.2024

Haas, M.; Fleck, S.; Kolb, T.: Entrained Flow Gasification of Suspension Fuels – A New Modeling Approach to Investigate Processes in Burner Near Field. International Conference on Thermochemical Conversion Science: Biomass & Municipal Solid Waste to RNG, Biofuels & Chemicals. GTI Energy. Itasca, IL, USA, 10.09.2024

Held, M.; Bajohr, S.; Kolb, T.: LOHC as liquid phase in three phase methanation - Influence of the hydrogenation reaction of dibenzyl toluene on methanation reaction kinetics. International Congress of Chemical and Process Engineering. Czech Society of Chemical Engineering (CHISA). Prag, 28.08.2024. Online verfügbar unter <http://2024.chisa.cz/welcome/>.

Jakobs, T.; Richter, J.; Santo, U.; Haas, M.; Fleck, S.; Kolb, T.: Burner Development for HP-Entrained Flow Gasification. 3rd Topic-Workshop Resource and Energy Efficiency (MTET). Karlsruhe, 21.02.2024

Jakobs, T.; Wachter, S.; Fleck, S.; Kolb, T.: Spray Investigations for Nozzle Design. DECHEMA, Fachgruppentagung Mehrphasenströmung. Dechema. Bremen, 20.03.2024

Santo, U.; Böning, D.; Jakobs, T.; Fleck, S.; Michelfelder, B.; Zimmerlin, B.; Kolb, T.: Hochdruck-Flugstromvergasung: Validierte Daten aus Experimenten im Pilotmaßstab für Optimierung und Scale-up. Jahrestreffen DECHEMA, FG Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung (AuW)). Dechema. Dresden, 25.03.2024

Wolf, M.: Sustainable aviation fuels – Tailored Fischer-Tropsch synthesis through advanced catalyst development. Präsentation. ACHEMA 2024, Frankfurt, 10.-14.06.2024

Wolf, M.: Scale bridging catalyst development – From powder to pellet, from batch to conti. Modern Concepts in Catalysis: From Science to Engineering (The South-West-German Catalysis Course 2024), Bad Herrenalb, 16.-18.09.2024

Wolf, M.; Zimina, A.; Saraçi, E.; Elbuga-Ilica, R.; Hsu, C.; Sireci, E.; Zhao, D.; Chanerika, R.; Fadlalla, M.; Studt, F.; Claeys, M.; Grunwaldt, J.-D.: New perspectives for Fischer-Tropsch synthesis: development and advanced characterization of next-generation cobalt catalysts. 56. Jahrestreffen Deutscher Katalytiker, Weimar, 13.-15.03.2024

- Wolf, M.: Sustainable aviation fuels – Tailored Fischer-Tropsch synthesis through advanced catalyst development. Präsentation. ACHEMA 2024, Frankfurt, 10.-14.06.2024
- Wolf, M.: Scale bridging catalyst development – From powder to pellet, from batch to conti. Modern Concepts in Catalysis: From Science to Engineering (The South-West-German Catalysis Course 2024), Bad Herrenalb, 16.-18.09.2024
- Wolf, M.; Zimina, A.; Saraçi, E.; Elbuga-Ilica, R.; Hsu, C.; Sireci, E.; Zhao, D.; Chanerika, R.; Fadlalla, M.; Studt, F.; Claeys, M.; Grunwaldt, J.-D.: New perspectives for Fischer-Tropsch synthesis: development and advanced characterization of next-generation cobalt catalysts. 56. Jahrestreffen Deutscher Katalytiker, Weimar, 13.-15.03.2024.
- Mörs, Biogasanlagen-Clusterung in Deutschland - Chancen und technische Möglichkeiten, Biogastage Bad Buchau, 01/2024
- Staudt, Schwarz, Wasserstoffimporte - wieviel, woher und zu welchen Kosten?, H2 Lunch and Learn DVGW, 01/2024
- Bär, Biogas in Deutschland: Erzeugung, Aufbereitung und Einspeisung, Gaskurs, 04/2024
- Staudt, Wasserstoffimportoptionen - Wie kommt der Wasserstoff nach Deutschland? Am Beispiel Ammoniak, 4. Technikforum Wasserstoff DVGW, 04/2024
- Mörs, Staudt, von Lewinski, Bajohr, Graf, Kolb, Chances of Renewable Methane as Hydrogen Import Route, IGRC Banff, 05/2024
- Staudt, Schwarz, Mörs, Hydrogen imports – how and where from?, EGATEC Hamburg, 06/2024
- Mörs, Aktuelle Entwicklungen zur Biogasaufbereitung, Einspeisung und Verflüssigung, 2. Biomethantag, 07/2024
- Staudt, Wasserstoffimportoptionen - Wie kommt der Wasserstoff nach Deutschland? Am Beispiel Ammoniak, Fachforum Ammoniak, DVGW-Kongress, 08/2024
- Staudt, Biogasanlagen-Clusterung in Deutschland – Chancen und technische Möglichkeiten, Biogas Tag Würzburg, 10/2024
- Staudt, Ruske, Graf, Welche? Wann? Wie? LNG2Hydrogen – Die zukunftsfähige Nutzung von LNG-Terminal-Standorten als logistische Knotenpunkte für Wasserstoff und dessen Derivate, Parlamentarischer Abend TransHyDE, 11/2024
- Mörs, Dynamic Operation of a Methanation Plant, H2Mare Konferenz, 05/2024
- Schütz, J.: „Odorierung: Etablierte Sicherheit in der Gasverteilung – auch für Wasserstoff“, DVGW-Kongress H2 Sicherheit, Online 03/2024
- Schütz, J.: „Das DVGW-Regelwerk – auch für Wasserstoff“ Haus der Technik Essen, Online 06/2024
- Schütz, J.: „Neues Verfahren zur Beprobung von LNG-Tankstellen“, 65. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches, Leipzig 09/2024

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

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

2.1 Lehre und Forschung

Im Jahr 2024 konzentrierte sich der Institutsteil Verbrennungstechnik auf Forschungsthemen rund um die flexible Bereitstellung von Energie und arbeitete dafür an bereits etablierten Forschungsgebieten sowie an neuen Themen. Eine Vielzahl von Untersuchungen wurden dabei durchgeführt, darunter zur Energiespeicherung und -umwandlung, zur Rußbildung, zu Verbrennungstechnik in stationären und Flugzeuggasturbinen sowie für die grundlegende Beschreibung von Verbrennungsvorgängen durch numerische Simulation. Auch der ehemalige Leiter Prof. Bockhorn war an einigen dieser Untersuchungen beteiligt.

Der Forschungsschwerpunkt des Institutsteils Verbrennungstechnik ist auf die Herausforderung des Übergangs zu einer kohlenstoffneutralen Energieversorgung ausgerichtet. Dies erfordert eine umfassende Umstellung auf alternative Energieträger wie Metalle, Schwefel, Wasserstoff und Wasserstoffgemische. Gleichzeitig wird auch auf kohlenstoffhaltige Prozessgase geforscht, um die Energieversorgung sicherzustellen und die Umweltbelastung zu minimieren.

Die Verbrennung wird weiterhin in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung eine wichtige Rolle spielen, insbesondere in Bezug auf Energiespeicherung und effiziente Nutzung, erneuerbare Energien und alternative Kraftstoffe sowie

die Bereitstellung und Verteilung der gespeicherten Energie. Um erneuerbare Energien nutzen zu können, sind eine schnelle und präzise Steuerung von Verbrennungsprozessen sowie eine intelligente Vernetzung notwendig. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschern, Industrie und Politik, um die Herausforderungen der Energiewende zu meistern.

Die Forschung konzentriert sich auch auf die Integration von alternativen und erneuerbaren Energiequellen in Produktionsprozesse bei gleichzeitiger Absicherung der Produktqualität. Hierzu müssen die Anforderungen an die Energieeffizienz im Herstellungsprozess und die präzise Steuerung aller beteiligten Teilprozesse erhöht werden. Dies erfordert eine umfassende Analyse der gesamten Wertschöpfungskette und die Entwicklung von innovativen Lösungen, um die Umweltbelastung zu reduzieren und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.

Die aktuellen Fragestellungen erfordern eine Betrachtung der Gesamtsystemtechnik, wodurch die Bedeutung der interdisziplinären Zusammenarbeit und der Verbundforschung, insbesondere mit den Werkstoffwissenschaften, zunimmt. Für die exakte Modellierung und numerische Simulation komplexer und multiskaliger Prozesse sind sowohl experimentelle als auch numerische Methoden von entscheidender Bedeutung. Die zunehmende Rechenleistung ermöglicht es, die Prozesse immer genauer zu modellieren und zu simulieren,

was eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung von innovativen Lösungen ist.

Aufgrund dieser Überlegungen verfolgt der Institutsteil Verbrennungstechnik folgende Forschungsschwerpunkte:

- Die Untersuchungen zu Zündvorgängen, Strömungs- und Verbrennungsinstabilitäten, der Spraybildung und Verbrennung neuartiger flüssiger Brennstoffe, die Wechselwirkungen zwischen Verbrennungsprozessen und Werkstoffen.
- Die Kombination von Verbrennungsprozessen mit anderen Verfahren wie thermoelektrischen, elektrochemischen (Elektrolyse, Brennstoffzellen), solarthermischen und solar-chemischen Verfahren, die nicht nur den energetischen, sondern verstärkt auch den stofflichen Aspekt des Verbrennungsprozesses in den Vordergrund rücken.

Diese Forschungsschwerpunkte sollen dazu beitragen, die Energieversorgung sicherzustellen, die Umweltbelastung zu reduzieren und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Durch die Entwicklung von innovativen Lösungen kann die Energiewende beschleunigt und die Zukunft der Menschheit gesichert werden.

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 Ergebnis konnten im Jahr 2024 sechs Bachelor- und drei Masterarbeiten abgeschlossen werden.

2.2 Laufende Forschungsarbeiten im Institutsteil Verbrennungstechnik

Die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Verbrennungstechnik konzentriert sich auf Problemstellungen, die sich in Zusammenhang mit der für die Speicherung und Bereitstellung von Energie aus nachwachsenden und fossilen Rohstoffen ergeben. Hier sind insbesondere innovative chemische Energiespeicher zu nennen, die Energie in verschiedenen Stoffsystemen, wie z. B. auf Schwefel oder Eisen basierenden, speichern können. Neben der Erforschung neuer Energiespeicher werden auch neue Energieträger wie Wasserstoff und Ammoniak mit ihren spezifischen Herausforderungen untersucht. Allen neuen Forschungsgebieten intrinsisch sind Bestrebungen wie eine Reduktion der Entstehung von Schadstoffen bei der Verbrennung, die Entwicklung von neuen Verbrennungskonzepten für schadstoffarmen Betrieb, sowie die Entwicklung von Modellierungsansätzen für die Vorausberechnung von Ver-

brennungsvorgängen und Verbrennungseinrichtungen, die zu deren Optimierung genutzt werden können. Die in diesen vielfältigen Themenbereichen durchgeführten Forschungsvorhaben werden sowohl in internationalen als auch nationalen Verbundvorhaben und direkten Industriekooperationen durchgeführt. Die folgenden Projektbeschreibungen geben dazu einen kurzen Einblick in aktuelle Forschungsaktivitäten.

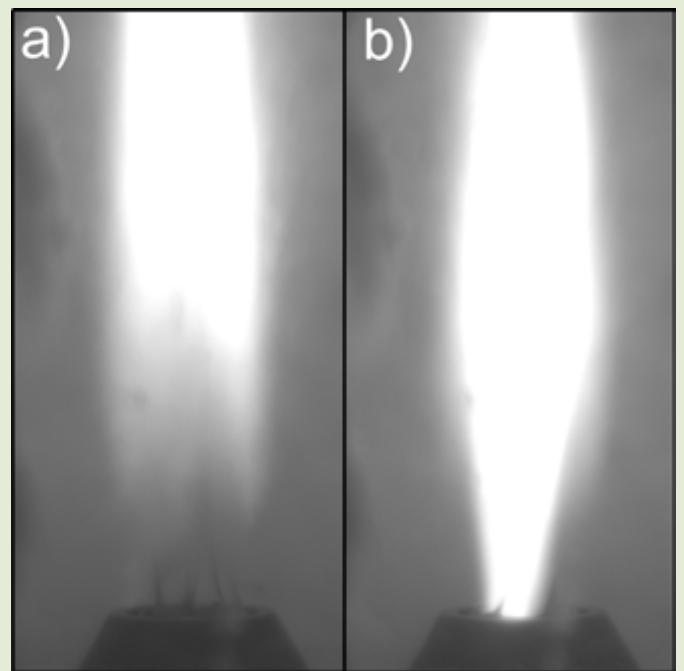
Am Institutsteil Verbrennungstechnik wurden im Jahr 2024 insbesondere zwei Schwerpunkte verfolgt: Einerseits wurden im Bereich der Energiespeicher, die Projekte „SULPHURREAL“ und „Clean Circles“ bearbeitet. Andererseits wurde der Bereich der neuen Energieträger Wasserstoff und Ammoniak untersucht, wobei hier Projekte wie „H₂-Turb“, „FFLECS“, die Beteiligung am DFG Schwerpunktprogramm 2419 „HyCAM“ und weitere, im neu geschaffenen Ammoniak-Labor durchgeführte Untersuchungen von Bedeutung sind.

Das vom European Innovation Council geförderte Projekt „SULPHURREAL“ verwendet einen innovativen Ansatz zur direkten Speicherung von konzentrierter Sonnenenergie in festem elementarem Schwefel. Das Hauptziel des Projekts ist die Entwicklung und Validierung des Ansatzes zur kohlenstofffreien, direkten Umwandlung von Sonnenenergie in Energie speichernde Chemikalien, die auch in bestehende Großindustrie integriert werden können. Schwefel, das neunthäufigste Element der Erde, ist ein wichtiges Nebenprodukt der Erdgasentschwefelung in der Ölindustrie mit einer jährlichen Produktion von etwa 70 Mio. t und erfüllt damit das genannte Kriterium. Elementarer Schwefel als Speichermedium ermöglicht zudem eine effiziente, kostengünstige und nachhaltige Langzeitspeicherung solarer Energie, die bei Bedarf wieder freigesetzt werden kann. Das in der Verbrennung entstehende Schwefeldioxid kann in die Schwefelsäureindustrie integriert werden, was den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft entspricht. Am EBI wird die Verbrennung von elementarem Schwefel theoretisch und experimentell untersucht. Dazu wird ein detaillierter Reaktionsmechanismus für die Beschreibung der Schwefelverbrennung mithilfe von „ab initio“-Verfahren entwickelt.

Ein wichtiger Schritt für die Validierung des Modells der Kinetik der chemischen Umsetzung sowie für die Auslegung eines Brenners ist die Bestimmung der „Zündverzugszeit“ als verbrennungstechnische Kenngröße des Schwefels. Experimentell wird dies in einem speziell dafür hergestellten Reaktor realisiert, in dem man sowohl Flammen (Bild 2.1, links), als auch die Verbrennung nach Selbstzündung (Bild 2.1, rechts) beobachten kann. Der Durchsatz am Umschlagspunkt liefert dabei die Information zur Berechnung der Zündverzugszeit. Weitere Untersuchungen umfassen Flammen nach einer Airblast-Düse mit variabler Drallstärke und die auf den Ergebnissen basierende Skalierung für eine höhere Leistungsdichte.

Auch Eisen als reaktives Metall hat enormes Potenzial für die Energiewende. Im Forschungsprojekt „Clean Circles - Eisen als Energieträger einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft“ wird an verschiedenen Forschungsstandorten in Deutschland interdisziplinär erforscht, wie das Metall zusammen mit sei-

Bild 2.1: Messung der Zündverzugszeit durch Bestimmung des Flammenschlagspunktes



nen Oxiden in einem Kreislauf als kohlenstofffreier chemischer Energieträger zur Speicherung von Wind- und Sonnenenergie genutzt werden kann. Mit regenerativ erzeugtem Strom wird Eisenoxid reduziert (Einspeicherung). Örtlich und zeitlich davon getrennt wird das Eisen unter Energiefreisetzung zur Stromerzeugung oxidiert (Ausspeicherung). Dadurch können große Mengen an erneuerbarer Energie CO_2 -frei gespeichert, transportiert und bereitgestellt werden – eine zentrale Herausforderung der Energiewende, die bislang noch nicht gelöst ist.

Unter der Leitung von Professor Trimis wird die thermochemische Hochtemperaturoxidation in laminaren Eisenstaubflammen experimentell untersucht. Dazu wurde ein Eisenstaubbrenner vom Typ Bunsen entwickelt, mit dem grundlegende Phänomene und Kenngrößen der Eisenstaubverbrennung untersucht werden können. In zahlreichen Grundlagenexperimenten wurden Flammenstabilität, Flammgeschwindigkeit, Partikelgrößenverteilungen sowie die unerwünschte Bildung von Nanopartikeln bei der Verbrennung mikrometergroßer Eisenpartikel untersucht.

In 2024 lag in diesem Zusammenhang ein besonderer Fokus auf der in situ Quantifizierung der Eisenoxidphasen in Eisenstaubflammen mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie (X-Ray Absorption Spectroscopy, XAS) am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg. Die Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Professor J.-D. Grunwaldt vom Institut für Technische Chemie und Polymerchemie (ITCP) des KIT.

Bild 2.2 zeigt die molaren Anteile von Eisen und seinen Oxiden, rekonstruiert aus den entlang der Sichtlinie integrierten Röntgenabsorptionsspektren mithilfe einer inversen Abel-

transformation, exemplarisch dargestellt für eine Flamme mit einem Äquivalenzverhältnis von 1,0 und einer Ausströmgeschwindigkeit von 40 cm/s. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass mikrometergroße Eisenpartikel in der Reaktionszone der Bunsenflamme teilweise zu FeO und Fe_2O_3 oxidieren, während die vollständige Oxidation zu Fe_2O_3 überwiegend in der Postflammenregion stattfindet. Letzteres wurde durch Messungen mit der Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) bestätigt.

Am Lehrstuhl für die Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme unter der Leitung von Professor Stein liefen im Jahr 2024 weitere grundlegende numerische Untersuchungen zur Eisenstaubverbrennung im Rahmen des „Clean Circles“ Projekts. Zur Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf das Zünd- und Brennverhalten von Eisenpartikeln wurde eine direkt numerische Simulation der Trägerphase (CP-DNS) in einer turbulenten Mischschicht durchgeführt. Ziel war es, die physikalischen und thermochemischen Prozesse, sowie die Wechselwirkungen zwischen Eisenpartikeln und Gasphasenströmung besser zu verstehen, die in den Scherschichten von industriellen Eisenbrennern auftreten können. **Bild 2.3** (links) zeigt das dreidimensionale Rechengebiet mit 85 Millionen Gitterzellen. Der obere Strom besteht aus vorgewärmter Luft beladen mit mikrometergroßen Eisenpartikeln, die dem unteren Strom aus heißer Luft entgegenströmt. Mit fortschreiten der Zeit vermischen sich die Ströme, so dass die Partikel in den unteren Strom gelangen, sich dort aufheizen und oxidieren. Zuvor bereits durchgeführte Simulationen mit monodispersen Partikeln (MD) wurden in einer Folgearbeit auf eine polydisperse (PD) Verteilung aus der KIT-Bunsenflamme erweitert. Wie in **Bild 2.3** (rechts, oben) erkennbar, zünden die Partikel im MD-Fall einheitlich innerhalb eines kurzen Zeit-

raums, geben die freigesetzte Wärme ab und erhöhen somit die Gastemperatur. Beim PD-Fall in **Bild 2.3** (rechts, unten) zünden kleinere Partikel zuerst, aber deren freigesetzte Energie reicht nicht aus, um das umgebende Gas signifikant zu erhöhen, was zeitverzögert erst nach der Zündung der größeren Partikel geschieht. Als Netto-Resultat zündet die polydisperse Mischungsschicht insgesamt später, gegenläufig zur intuitiven Erwartung. Die Simulation zeigt, dass die Partikelgröße das Zünd- und Brennverhalten von Eisenstaubwolken entscheidend beeinflusst und dass diese Effekte bei der Auslegung von turbulenten Industriebrennern berücksichtigt werden müssen.

Ammoniak, das aus grünem Wasserstoff synthetisiert werden kann, bietet aufgrund seiner einfachen Verflüssigbarkeit, der damit verbundenen effizienten Transportfähigkeit über weite Distanzen sowie der bereits vorhandenen Infrastruktur ein vielversprechendes Potenzial als kohlenstofffreier Energieträger. Die Nutzung von Ammoniak in Verbrennungsprozessen ist jedoch mit spezifischen Herausforderungen verbunden. Im Vergleich zu konventionellen Kohlenwasserstoffen zeigen sich insbesondere drei zentrale Herausforderungen:

1. Niedrige Verbrennungsgeschwindigkeit, was zu einer verringerten Flammenstabilität führt

2. Hohe Stickoxidemissionen (NO_x) infolge der stickstoffhaltigen Molekülstruktur
3. Toxizität von unverbranntem Ammoniak, was hohe Anforderungen an die Abgasreinigung stellt

Um diese Herausforderungen zu adressieren und den Einsatz der Ammoniakverbrennung in technisch relevanten Anwendungen zu ermöglichen, ist ein tiefgehendes Verständnis der Reaktionskinetik und Verbrennungsprozesse erforderlich. Hierfür wurde ein speziell ausgestattetes Labor zur Durchführung sicherer und kontrollierter Ammoniakverbrennungsexperimente eingerichtet. Die Versorgung erfolgt über beheizte Flüssiggasflaschen, während ein umfassendes Sensoriksystem mit automatisierter Notabschaltung die Betriebssicherheit gewährleistet. Ein nachgeschalteter Gaswäscher verhindert die Emission von unverbranntem Ammoniak in die Umgebungsluft.

Die Ammoniakverbrennung wurde bereits in verschiedenen Konfigurationen untersucht (siehe **Bild 2.4**). In Bunsenflammen wurden mithilfe optischer Diagnostik Effekte der Wasserstoffbeimischung analysiert. Ergänzend validierten Gegenstromflammenexperimente numerische

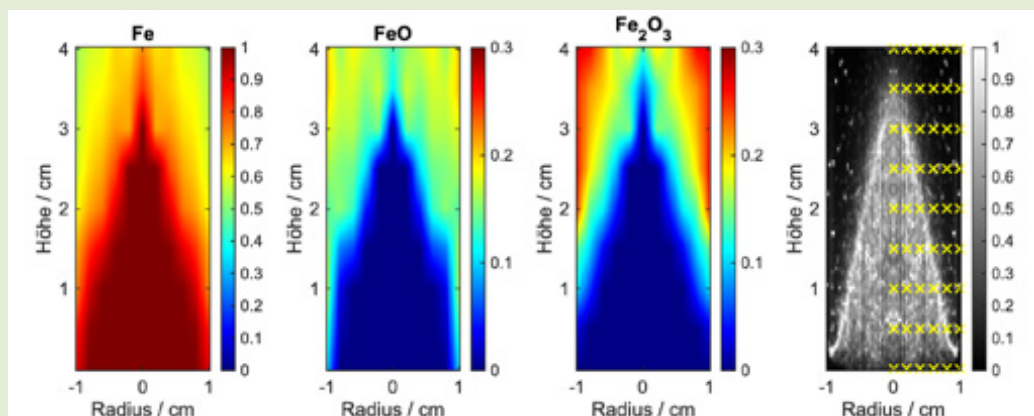


Bild 2.2: Molare Anteile von Fe, FeO und Fe_2O_3 einer stöchiometrischen Eisenstaubflamme mit einer Ausströmgeschwindigkeit von 40 cm/s. Rechts sind die Messpunkte innerhalb der achsensymmetrischen Bunsenflamme markiert, an denen Röntgenabsorptionsspektren aufgezeichnet wurden

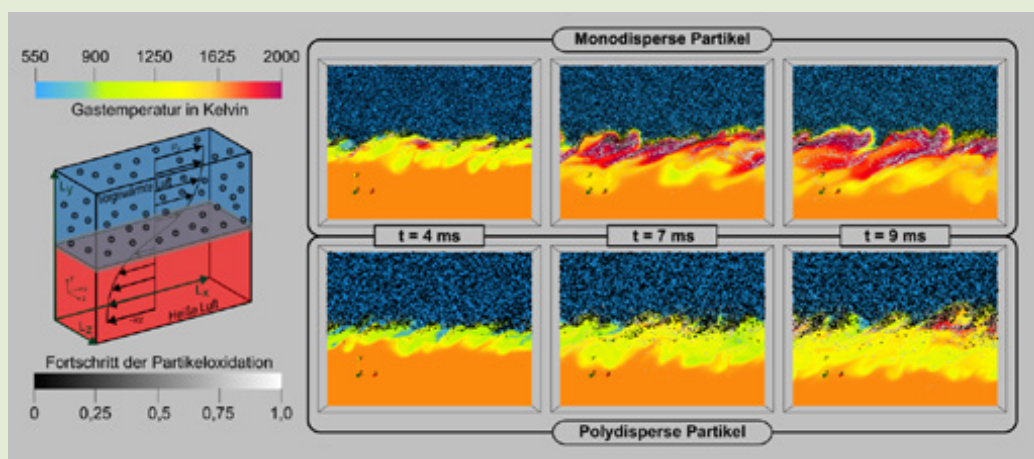


Bild 2.3: Rechengebiet der dreidimensionalen turbulenten Mischungsschicht (links) und qualitative Simulationsergebnisse (rechts). Dargestellt ist die Gastemperatur in einer x-y-Ebene für monodisperse Eisenpartikel (oben) und eine polydisperse Partikelverteilung (unten). Die Partikel sind nach ihrem Oxidationsfortschritt eingefärbt (schwarz: Eisen, weiß: Eisenoxid)“

Bild 2.4: Fotografie und Abel-Inversion einer laminaren, nicht-vorgemischten Ammoniakflamme mit einem Wasserstoffanteil von 30%. Rechts: Schematischer Aufbau des Gegenstrombrenners und Fotografie verschiedener Ammoniakflammen mit unterschiedlicher Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft

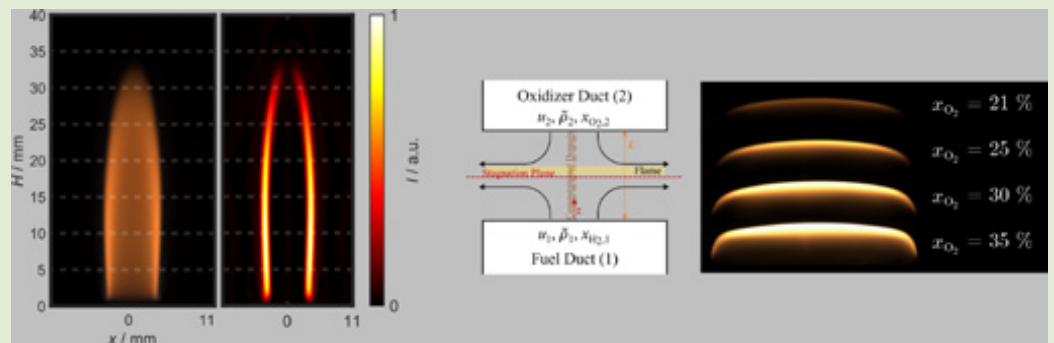
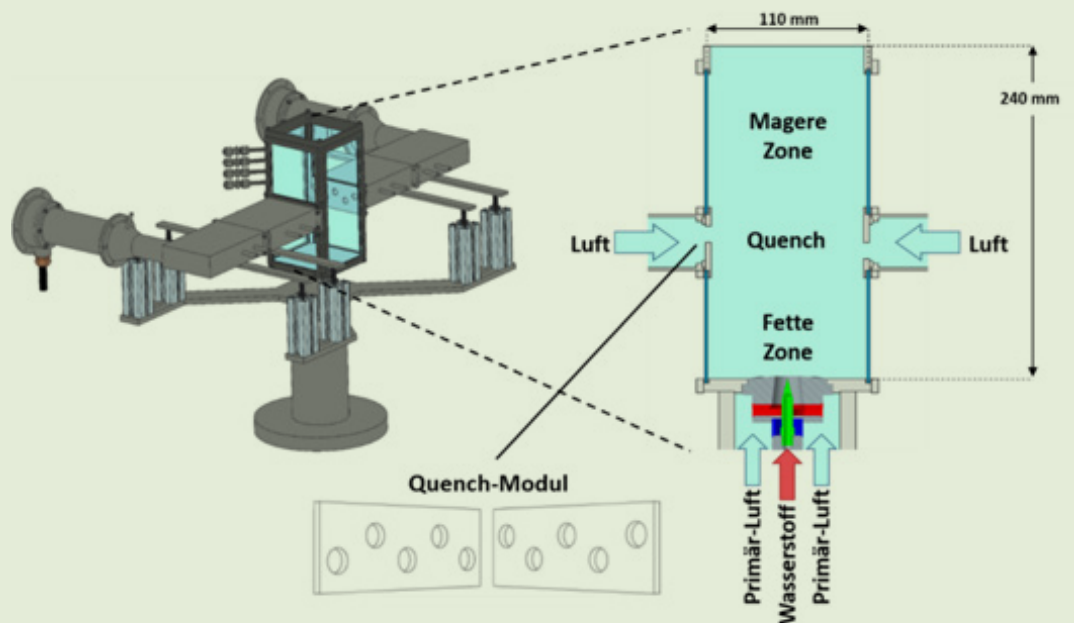


Bild 2.5: Schematische Darstellung der RQL-Modellbrennkammer



Reaktionsmechanismen und lieferten wichtige Einsichten in die Kinetik.

Im Rahmen des DFG-geförderten Projekts „HyCAM“ im Schwerpunktprogramm SPP 2419 wird ein innovativer Ansatz verfolgt: die nicht-vorgemischte Ammoniakverbrennung in maßgeschneiderten, keramischen, porösen, inerten Medien (PIM). Dieses interdisziplinäre Projekt vereint Kompetenzen aus experimenteller Forschung (EBI-VBT), numerischer Simulation (EBI-TFS) und additiver Fertigung (TU-BAF-IKFVW).

Durch die Integration des porösen Mediums wird die effektive Flammengeschwindigkeit durch Wärmerückführung aus der festen Phase signifikant erhöht, was die Flammenstabilität maßgeblich verbessert. Gleichzeitig begünstigt das PIM die vollständige Umsetzung des Brennstoffs durch gezielte Vermischung und Temperaturhomogenisierung. Erste Untersuchungen zeigen, dass selbst reine Ammoniak/Luft-Flammen über einen breiten Leistungsbereich stabilisiert werden können. Darüber hinaus trägt die nicht-vorge-

mischte Betriebsweise nachweislich zu einer deutlichen Reduktion der Schadstoffemissionen bei.

Zur Umsetzung der Klimaziele bietet es sich auch an, moderne Gasturbinen (mobil oder stationär) mit Wasserstoff statt Kerosin oder Erdgas zu betreiben. Dadurch werden CO_2 - und Feinstaubemissionen vollständig vermieden. Zusätzlich ergibt sich für die Luftfahrt das Potenzial reduzierter NO_x -Emissionen sowie einer verringerten Kondensstreifenbildung aufgrund fehlender Feinstaubpartikel.

Vor diesem Hintergrund untersucht das Engler-Bunte-Institut, Institutsteil Verbrennungstechnik, zusammen mit den Partnern MTU Aero Engines (MTU) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) im Verbundprojekt „H₂-Turb“ Technologien für die Eindüsung und direkte Verbrennung von 100 % Wasserstoff in Gasturbinen. Ziel ist es, zur Entwicklung flugantriebsauglicher, emissionsarmer Brennerkonzepte für Wasserstoff beizutragen, wobei der Fokus auf der Nachrüstung (Retrofit) bestehender Flugzeugtriebwerke liegt.

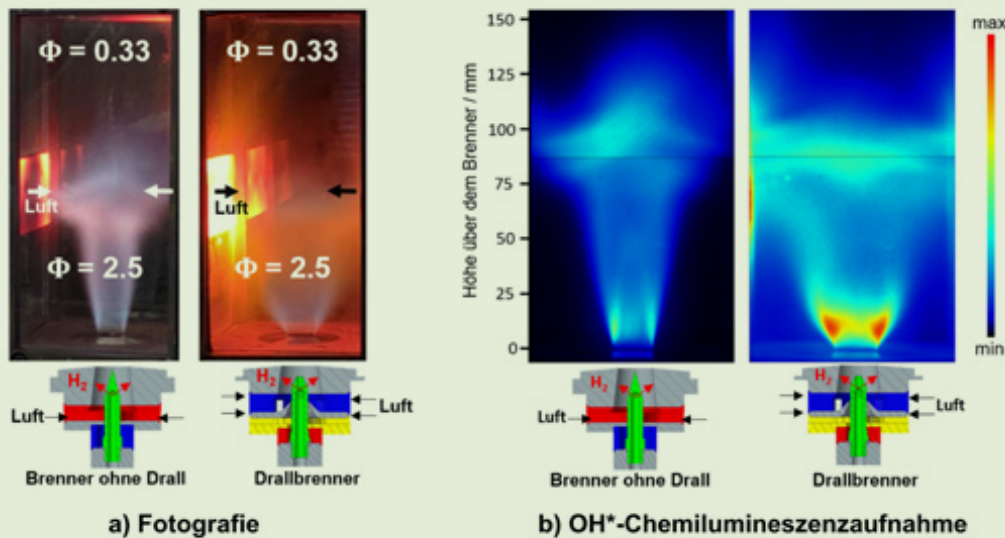


Bild 2.6: Entwickelte Brennerdüsen (ohne/mit Drall) und beispielhafte Betriebspunkte
a) Fotografie; b) OH*-Aufnahme (Mittelung von 300 Bildern bei 50Hz)

In Flugzeugtriebwerken wird derzeit überwiegend das sogenannte RQL-Verbrennungskonzept (*Rich-Quench-Lean*) für flüssige Brennstoffe eingesetzt. Dieses basiert auf einer Verbrennungsstufung, d. h. der Sequenz einer brennstoffreichen Primärzone (Rich, $\Phi > 1$), einer Mischzone (Quench) sowie einer brennstoffarmen Sekundärzone (Lean, $\Phi < 1$). Ziel dieser Fett/Mager-Stufung ist es, die NO_x -Emissionen durch Sauerstoffmangel (Primärzone) und niedrige Verbrennungstemperaturen (Sekundärzone) in einem weiten Betriebsbereich zu reduzieren.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden zunächst zwei verschiedene H_2 -Brennerdüsen konzipiert und anschließend in einer repräsentativen Modellbrennkammer (vgl. Bild 2.5) bei atmosphärischem Druck experimentell untersucht. Erreicht werden hierbei Leistungen bis ca. 130 kW sowie Leistungsdichten bis ca. 54 MW/m³. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Identifizierung der Flammenposition innerhalb der Primärzone und des Quench-Moduls mittels fotografischen und OH*-Chemilumineszenz-Aufnahmen sowie der Bestimmung der globalen NO_x -Emissionen am Brennkammerauslass. Bild 2.6 zeigt eine schematische Darstellung der entwickelten Brennerdüsen sowie beispielhaft Aufnahmen zweier Betriebszustände in der Versuchs-brennkammer.

Die Untersuchung zeigt, dass für beide getesteten Brennerdüsen ein Flammenrückschlag unter den untersuchten Betriebsbedingungen vermieden wird, was die erfolgreiche Adaption des RQL-Konzeptes auf die Verbrennung mit 100 % Wasserstoff bestätigt.

Bild 2.7 zeigt die ermittelten globalen NO_x -Emissionen zweier Versuchsreihen bei einer relativen Luftdruckdifferenz $\Delta p/p$ von 3 % bzw. 5 % über der jeweiligen Brennerdüse. Besonders beim Drallbrenner wird deutlich, dass eine brennstoffreichere Primärzone trotz höherer Temperaturen am

Brennkammeraustritt zu niedrigeren NO_x -Emissionen führt. Im Vergleich zu anderen typischen RQL-Brennkammern für Flugzeugtriebwerke mit Kerosin weisen beide in dieser Studie untersuchten Brennerdüsen geringere NO_x -Emissionen auf. Dabei erzielt der Brenner ohne Drall für alle untersuchten Betriebspunkte niedrigere Emissionswerte als der Drallbrenner.

Im Rahmen einer weiteren Studie wurde in Zusammenarbeit mit dem SCC und dem IFKM die Vorhersage von Emissionswerten von Verbrennungsmotoren während des Kaltstarts untersucht. Für diese Vorhersage werden zwei Modelle für maschinelles Lernen (ML) verwendet: ein Multilayer-Perceptron (MLP) und ein Encoder-Decoder-Recurrent-Neural-Network (ED-RNN) (Bild 2.8). Die Modelle werden mit Daten von einem Turbo-Charged-3-Zylinder-Motor mit 999 ccm trainiert. Die Eingabedaten umfassen verschiedene Temperaturwerte und Motorparameter. Die Vorhersagen umfassen Emissionsdaten von NO_x , CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHC).

Die Studie zeigt, dass das ED-RNN-Modell in der Lage ist, die Vorhersagen mit hoher Genauigkeit durchzuführen, insbesondere in Szenarien, in denen die Modelle mit neuen Temperaturwerten oder Fahrzyklen konfrontiert werden. Das MLP-Modell hingegen zeigt eine geringere Genauigkeit. Die Studie zeigt auch, dass das ED-RNN-Modell in der Lage ist, die Vorhersagen in Echtzeit durchzuführen, was es für die Anwendung in der Motorensteuerung geeignet macht. Die Studie liefert daher einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung von Vorhersagemodellen für Emissionswerte von Verbrennungsmotoren während des Kaltstarts. Die Ergebnisse können daher in Zukunft dazu beitragen, die Emissionswerte von Motoren erheblich zu reduzieren.

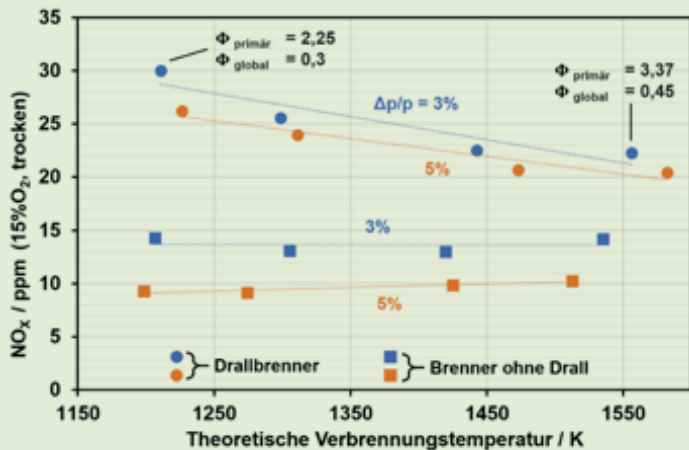


Bild 2.7: Globale NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der theoretischen Verbrennungstemperatur am Ausgang der Brennkammer bei verschiedenen Betriebsbedingungen

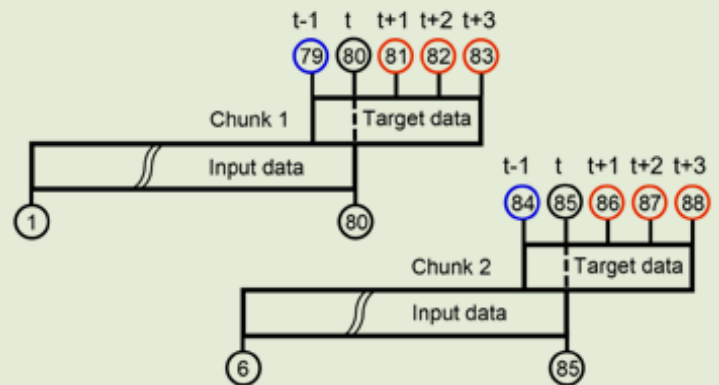


Bild 2.8: Schematische Darstellung der Eingabe- und Ausgabedatensequenzen für das ED-RNN-Modell: Die Zahlen in den Kreisen geben die entsprechenden Zeitschritte für die ersten und zweiten Datenpakete an. Orange Zeitschritte liegen in der „Zukunft“, blaue Schritte in der „Vergangenheit“

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 2024 wurde am Institutsteil Verbrennungstechnik eine Dissertation abgeschlossen. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die Arbeiten dieser Dissertation:

Mohamed Shamma: Experimental Investigations of flame interaction in multi-burner arrays with lean-lifted spray flames. (Prof. Dr. D. Trimis, Prof. Dr. A. Andreini)

Die Dissertation präsentiert die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung des Verbrennungsverhaltens eines neuen Verbrennungskonzepts, des CHAIRLIFT-Konzepts (*Compact Helical Arranged combustors with Lean LIFTed Flames*). Das CHAIRLIFT-Konzept kombiniert schwach verdrahlte, mager brennende Sprayflammen mit einer Short Helical Combustor (SHC) - Anordnung, bei der die Flammenachsen relativ zur Turbinenachse geneigt werden, um die Flammeninteraktion in Umfangsrichtung zu verbessern und die Verbrennungsstabilität zu erhöhen (**Bild 2.9**).

Die experimentelle Untersuchung wurde an einem Mehrbrenner-Testaufbau durchgeführt, bei dem die Brenneranordnungen so variiert wurden, dass sie jeweils eine helikal gestaffelte Brennkammer mit verschiedenen Anstellwinkeln simulieren. Der Testaufbau war mit fortschrittlichen optischen Diagnosemethoden ausgestattet, einschließlich *Particle Image Velocimetry* (PIV), Mie-Streuung und OH^* -Chemilumineszenz, um das Verbrennungsverhalten mit hoher räumli-

cher Auflösung zu analysieren (**Bild 2.10**). Auch invasive Messmethoden wurden verwendet, um Temperaturprofile und Emissionskonzentrationen zu erfassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten, schwach verdrahlten Flammen verglichen mit stärker verdrahlten Flammen, die insbesondere durch größere innere Rezirkulationszonen gekennzeichnet sind, eine bemerkenswert hohe Stabilität aufweisen. Die schwach verdrahlten Flammen erzeugen dabei äußere Rezirkulationszonen (ORZ), die umgebendes, schwach verdrahltes Fluid aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit einsaugen. Die ORZ tragen damit erheblich zur Verbrennungsstabilität bei, indem sie reaktive Spezies stromauf transportieren. Die äußere Rezirkulation konnte als der dominierende Stabilisierungsmechanismus identifiziert werden.

Die untersuchten, schwach verdrahlten, mager brennenden Sprayflammen zeigen ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung von NO_x -Emissionen. Darüber hinaus deuten die Ergebnisse darauf hin, dass das gleiche Verbrennungskonzept auch in einer geeigneten Konfiguration angewendet werden könnte, da die niedrige Drallzahl unerwünschte Strömungsumlenkung reduziert und so eine günstigere Strömungscharakteristik bietet.

Leichte Unterschiede in der Verbrennungsstabilität und Emissionscharakteristik wurden zwischen der Reihenanordnung (Inline) und der geneigten Konfiguration beobachtet, wobei diese Anordnungen jeweils unterschiedliche Stabilisierungsmechanismen aufzeigen. Bei hohen Einlasslufttemperaturen zeigten Analysen überraschenderweise, dass die Inline-Anordnung der Brenner verglichen mit der geneigten Konfiguration eine leicht höhere Stabilität aufwies.

Die Arbeit zeigt auch das Potenzial für weitere Verbesserungen des CHAIRLIFT-Konzepts, indem Form und Größe der Seitenwand in der helikalen Anordnung angepasst wird, um

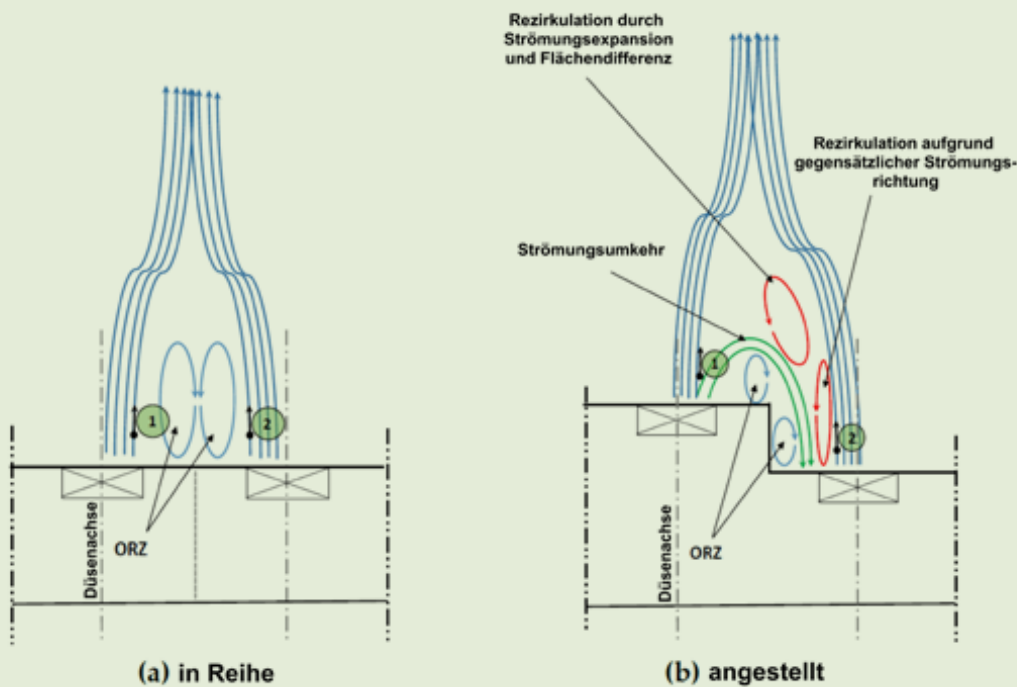


Bild 2.9: „Qualitatives, schematisches Modell der Wechselwirkung zwischen äußerer Rezirkulationszone (ORZ) und der Strömung benachbarter Sektoren bei unterschiedlich angestellten Brenneranordnungen

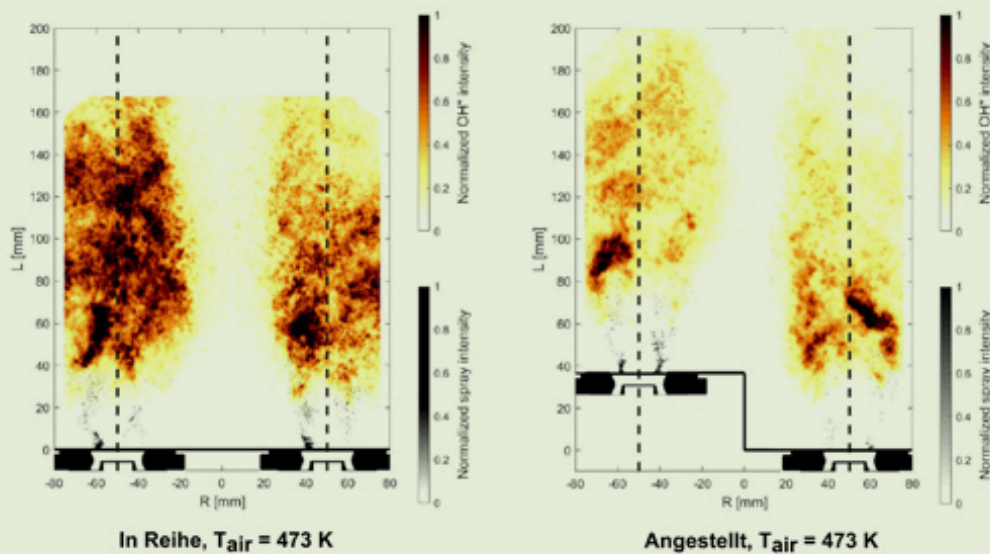


Bild 2.10: Kombinierte Darstellung von momentaner OH*-Chemilumineszenzintensität und Brennstoffspray ($\phi = 0,5$, $\Delta p/p_2 = 3 \%$)

so die Rezirkulationszonen zu optimieren. Zukünftige Untersuchungen könnten dieses Konzept auch unter höheren Druckbedingungen, ähnlich denen realistischer Antriebssysteme, untersuchen und dabei den Einfluss der Selbstentzündung auf die Stabilisierung in geeigneten Fällen erfassen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen zur Entwicklung und Optimierung der Magerverbrennung für Flugzeugtriebwerke bei. Die Forschung zeigt ebenso, dass abgehoben brennende, schwach verdrahlte Flammen konsistent niedrige NO_x -Emissionen über einen breiten Bereich von Betriebsbedingungen aufweisen. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass das Konzept der abgehoben brennenden Flammen auch effektiv in

geeigneten Konfigurationen angewendet werden kann, da die niedrige Drallzahl unerwünschte Strömungsablenkungen reduziert und so die Strömungsführung in eine für die Turbineneintrittsbedingungen günstige Richtung bietet.

Insgesamt zeigt die Dissertation, dass das CHAIRLIFT-Konzept ein vielversprechendes Verbrennungskonzept für Flugzeugtriebwerke ist, das erhebliches Potenzial zur Reduzierung von NO_x -Emissionen bietet. Die Forschungsergebnisse liefern wertvolle Einblicke in das Verhalten von schwach verdrahlten Flammen und ihr Potenzial zur Reduzierung von NO_x -Emissionen in Gasturbinen.

2.4 Forschungsstelle für Brandschutztechnik

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

IMK-Forschungsprojekt „Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes; Teil V: Experimentelle Untersuchungen“ (Abgeschlossen 2024)

Im Rahmen eines Forschungsauftrags der Innenministerkonferenz der Länder (IMK) wird an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik untersucht, welche Einflussparameter für die Berechnung von Bränden mit vereinfachten Modellen vorhanden sind und welchen Einfluss diese auf das Ergebnis haben. Der Bericht beschreibt zwei Versuchsreihen mit quadratischen, gasbetriebenen Kiesbettbrennern, die für die Validierung von Rechenmethoden herangezogen werden können. Es wurden Versuche im Freien (freie Flamme) und in einem ca. 25 m² großen Brandraum mit den gleichen Brennern durchgeführt. Dabei kamen zwei Kiesbettbrenner mit Seitenlängen von 0,3 m und 0,5 m zum Einsatz. Die Wärmefreisetzungsraten wurden variiert zwischen 50 kW und 250 kW mit dem Ziel ein möglichst breites Spektrum abzudecken. Im Brandraum wurde ein Referenzkörper aus Beton an die Decke des Brandraums angebracht. In den Versuchen wurde die Flammenlänge anhand der Videoaufnahmen ausgewer-

tet, die Plumentemperaturen wurden mit Thermoelementen, die Wärmestrahlung mit Gesamtwärmeflussaufnehmern und Radiometern und die Rauchschichthöhe mit Hilfe einer verfahrenbaren Sonde bestimmt. Die Versuche zeigten eine gute Reproduzierbarkeit. Auch die eingesetzten Referenzkörper zeigten hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften eine gute Reproduzierbarkeit. Die Messungen der Wärmestrahlung mit unterschiedlichen Messmethoden lieferten übereinstimmende Ergebnisse. Die Ergebnisse wurden sowohl für die Plumentemperatur (Bild 2.11) als auch die Flammenhöhe (Bild 2.12) mit Werten verglichen, die anhand aus der Literatur bekannter empirischer Gleichungen berechnet wurden. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung. Bei der Plumentemperatur im Brandraum wurden systematische Abweichungen festgestellt.

IMK-Forschungsprojekt „Besondere Eigenschaften von Wasserstoffflammen - Entwicklung einer Übungsfeueranlage für Feuerwehrangehörige“ (Projektlaufzeit: 2024-2025)

Ziel des IMK-Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Prüfstandes für die Feuerwehr, damit Feuerwehrangehörige mit den besonderen Eigenschaften von Wasserstoffflammen vertraut gemacht werden können und auf spezifische Gefahren hin sensibilisiert werden. Im Vordergrund steht dabei vor allem der didaktische Aspekt.

Als Ergebnis einer Abschlussarbeit ist bereits ein CH₄-H₂-Leckage-Prüfstand vorhanden. Dieser wird im Projekt

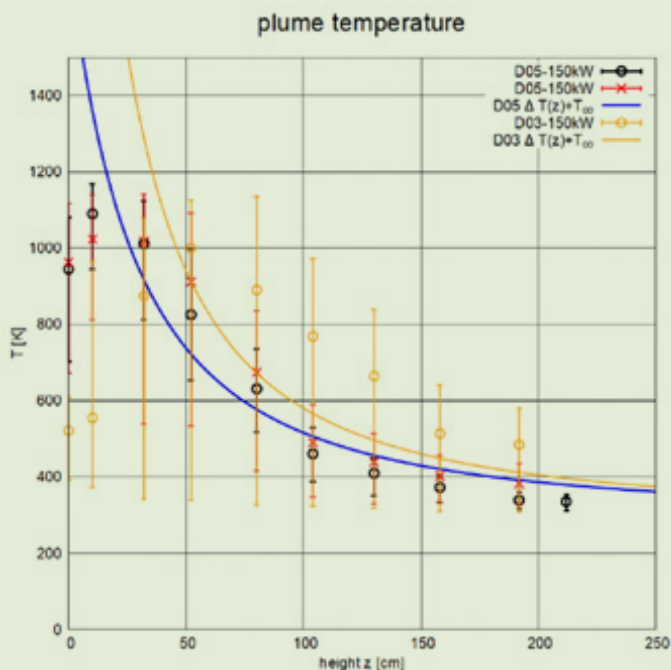


Bild 2.11: Gegenüberstellung gemessene Temperatur in der Plumentemperatur für die freie Flamme in Abhängigkeit der Raumhöhe z für $\dot{Q} = 150$ kW

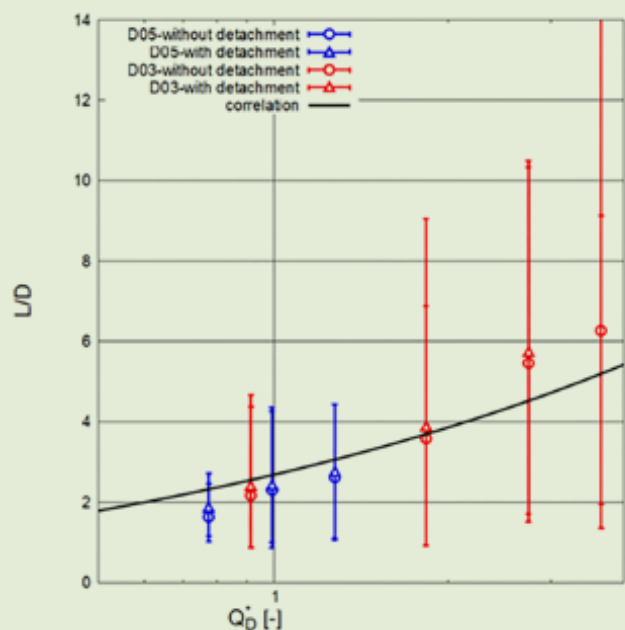


Bild 2.12: Gegenüberstellung Auswertung Flammenlänge mit und ohne Ablösung (detachment) für die freie Flamme mit Mittelwert und Maximalwerten und der Korrelation nach Heskestad für $D=0,3$ m und $0,5$ m und $\dot{Q} = 50, 100, 150, 200$ und 250 kW

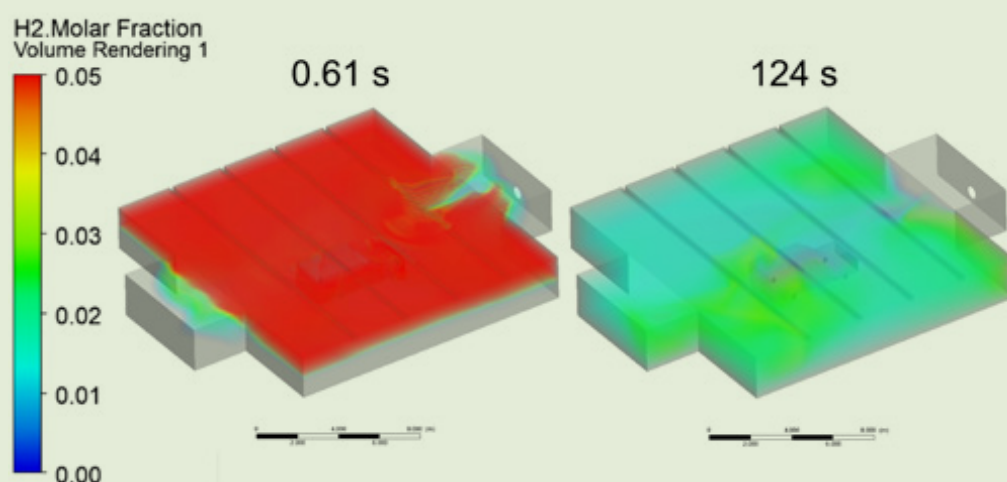


Bild 2.13: Der Lüfter (rechts) startet unmittelbar mit der Freisetzung von Wasserstoff. Zwischen den Unterzügen hat sich zündfähiges Gemisch gesammelt. Bereits gut eine Minute Lüften reicht, dass kein zündfähiges Gemisch mehr in der Tiefgarage vorhanden ist

für die Anwendbarkeit bei Feuerwehren optimiert und verschlankt, sodass die Feuerwehren am Prüfstand eine Ausbildung bezüglich der Eigenschaften von Wasserstoffflammen machen können. Die Entwicklung erfolgt in Zusammenarbeit mit Berufs- und Werkfeuerwehren und der Feuerweherschule. Geplant sind die Durchführung von Versuchstagen und eine Einweisung sowie Schulungen von Feuerwehrangehörigen in die Anlage.

Der Prüfstand wird stabile Methan- und Wasserstoffflammen mit einer Leistung von bis zu 100 kW generieren und voraussichtlich über gebräuchliche Flaschen mit 50 Liter / 200 bar versorgt. Es werden Pläne und Stücklisten erstellt, damit die Anlage von der Feuerwehr nachgebaut werden und somit zu Ausbildungszwecken genutzt werden kann.

IMK-Forschungsprojekt „Freigesetzter Wasserstoff in einer Tiefgarage oder Tunnel - Risiken bei der Entlüftung“ (Abgeschlossen 2024)

In diesem Projekt im Rahmen der Brandschutzforschung der Länder wurde untersucht, wie sich bei einer ungewollten Freisetzung Wasserstoff zeitlich und räumlich ausbreitet. Bei einer Freisetzung von Wasserstoff in teilverbauten Räumen wie z. B. Tiefgaragen und Tunnels ist es für die Taktik der Feuerwehr entscheidend, ob zündfähige Wasserstoff-Luft-Gemische beim Eintreffen vorhanden sind. Untersucht wurden die ersten Minuten nach Freisetzung von 6 kg Wasserstoff innerhalb von einer Minute. Angenommen wurde der ungünstigste Fall, dass der Wasserstoff an Bord eines PKW nicht in einem langen Freistrahle ausströmt und sich somit bereits früh mit der Luft verdünnt, sondern dass der Freistrahle unvermittelt auf ein Hindernis (z. B. am Unterboden des Fahrzeugs) trifft und dadurch diffus austritt. So kann sichergestellt werden, dass die Mischungsverhältnisse in der Realität nicht ungünstiger hinsichtlich der Ausdehnung zündfähiger Gemische sind. Sämtliche Berandungen sind undurchlässig für Wasserstoff.

Sowohl bei der Ausbreitung in bergmännisch gebauten Tunnels mit verschiedenen Steigungen ohne Zwangsströ-

mung und in einem Tunnel offener Bauweise mit Zwangsströmung durch Axialventilatoren, die im Modell als Impulsquellen modelliert werden, zeigte sich, dass nach wenigen Minuten der Wasserstoff so weit verdünnt war, dass keine zündfähigen Gemische mehr vorlagen.

Beim selben Szenario in einer Tiefgarage (Bild 2.13, links) sammelten sich zündfähige Wasserstoff-Luft-Mischungen zwischen den Unterzügen. Hier wurde zusätzlich untersucht, inwieweit die Feuerwehr mittels kleiner tragbarer Ventilatoren die Tiefgarage entlüften kann. Als Ergebnis ist in Bild 2.13 (rechts) dargestellt, dass die Garage mit den Ventilatoren innerhalb weniger Minuten entlüftet werden kann.

In einem Folgeprojekt 2025 wird die Durchlässigkeit verschiedener Baustoffe für Wasserstoff untersucht, um abschätzen zu können, wie lange die zündfähigen Mischungen bei stagnierender Strömung jeweils vorliegen können.

Laufende Forschungsarbeiten

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

Verbesserung der Sicherheit von H₂-Druckbehältern im Brandfall z. B. durch Applikation eines wärmeleitfähigen Materials zur Erhöhung der Auslösezuverlässigkeit eines temperaturlösenden Sicherheitsventils (TPRD), Teilprojekt: Experimentelle und simulationsgestützte Untersuchung und Verbesserung des Wärmetransports hin zum temperaturlösenden Sicherheitsventil (AiF ZIM Projekt, Projektpartner K. TEX GmbH, Projektlaufzeit: 2023-2025)

Die Anzahl von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb wird voraussichtlich zunehmen, wobei der Wasserstoff bei PKW in Druckbehältern mitgeführt wird. Damit diese im Brandfall nicht bersten, verfügen sie über ein temperaturlösendes Sicherheitsventil (TPRD, *temperature pressure relief device*), welches ab 110°C öffnet. Die TPRD werden in genormten

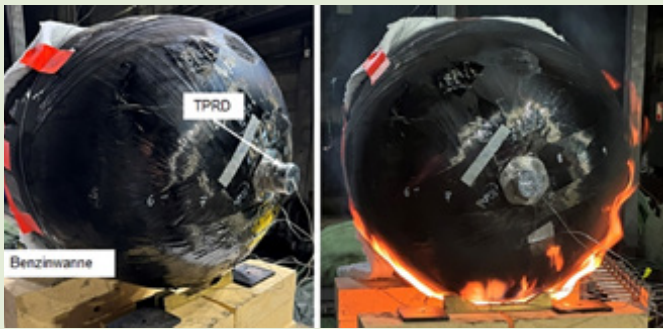
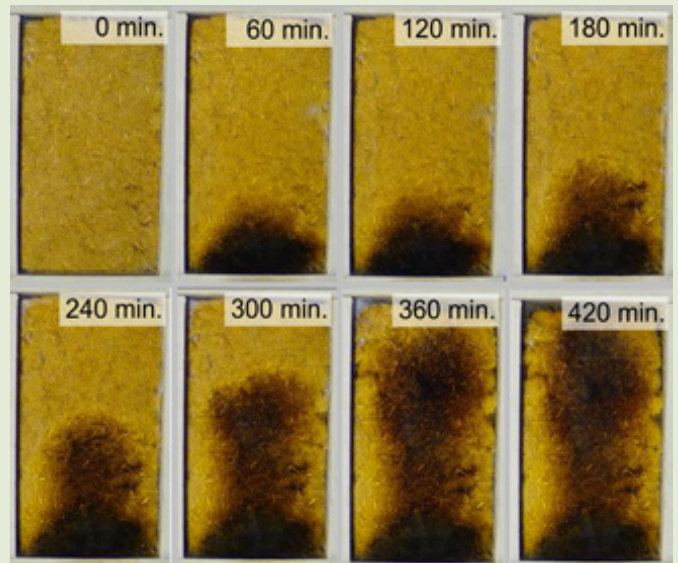
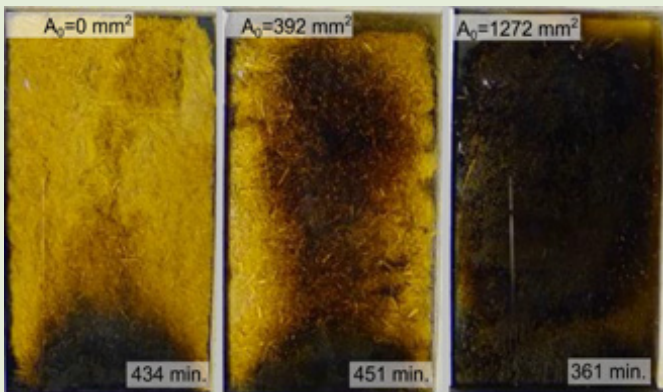


Bild 2.14: Untersuchungen an einem halben H_2 -Druckbehälter: Beflammung mittels Poolfeuer



▲ **Bild 2.16:** Lufteintrittsfläche = 392 mm^2 - Übersicht der Ausbreitung über den zeitlichen Verlauf

◀ **Bild 2.15:** Ausbreitungsverhalten bei verschiedenen Lufteintrittsflächen A_0

Tests auf ihre Wirkung überprüft, in dem der Behälter beflammt wird. Das TPRD muss rechtzeitig öffnen, so dass die Druckabnahme schneller erfolgt als die Strukturschwächung des Behälters, damit er nicht birst. Im realen Brandfall allerdings ist nicht von einer homogenen flächigen Beflammung auszugehen: bei Beflammung auf der dem TPRD abgewandten Seite kann es damit zum Behälterversagen durch Bersten kommen, weil das TPRD sich nicht schnell genug aufheizt, um eine Druckentlastung zu bewirken.

In dem Projekt werden unterschiedliche Materialien, die in bzw. auf den Compositverbund der Druckbehälter eingearbeitet sind, auf ihre Wärmetransportfähigkeit hin untersucht und ausgelegt, so dass das TPRD sich bei einseitiger Beflammung schneller aufheizt und öffnet, sodass als Folge das Bersten eines Druckbehälters bei Beflammung nahezu ausgeschlossen werden kann. **Bild 2.14** zeigt die Beflammung eines halben Druckbehälters mittels Benzin-Poolfeuer.

Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Schmelzbränden in Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (Projektlaufzeit: 2024-2025)

Der Anlass für diese Untersuchung ist die zunehmende Verwendung und Förderung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Trotz steigender Relevanz ist nur wenig über das Brandverhalten bekannt. Die wenigen vorhandenen

Forschungsergebnisse über das (Schmelz-)Brandverhalten dieser Dämmstoffe deuten auf eine kontinuierliche Schmelzneigung sowie die Entstehung von Kohlenmonoxid hin. In dieser Arbeit wird eine Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Schmelzbränden in Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen durchgeführt, wobei die Form und Art der Ausbreitung berücksichtigt werden. Dabei wird der Einfluss verschiedener Zuluftbedingungen berücksichtigt und die entstehenden Abgase analysiert.

Im Rahmen einer quantitativen Methode wurden Schmelzbrandversuche mit Holzfaserdämmplatten, welche in Kästen aus Brandschutzbauplatten platziert wurden, durchgeführt. Durch einen Strahler wurde die Unterseite der Kästen bis zu Initiierung eines Schmelzbrands erwärmt. Das Ausbreitungsverhalten und die Einflüsse der Zuluftbedingungen wurden durch ein Sichtfenster sowie messtechnisch mit Temperatur- und Abgasmessungen untersucht. Es wurden experimentelle Untersuchungen bei drei Lufteintrittsflächen A_0 (0 , 392 und 1272 mm^2) durchgeführt. Die Visualisierung der Ergebnisse ist in **Bild 2.15** dargestellt. **Bild 2.16** zeigt eine Übersicht der Ausbreitung bei einer Lufteintrittsfläche von 392 mm^2 .

Die Zuluftbedingungen hatten einen erheblichen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten. Mit Zunahme der Lufteintrittsfläche zeigte sich eine Erhöhung der der maximalen Reaktionstemperaturen, der Gewichtsabnahme des Dämm-

materials und der Abgastemperatur (s. Bild 2.17). Die Schweißbranddauer nahm hingegen ab. Es zeigte sich auch ein Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein bzw. der Größe der Zuluftflächen und der maximalen CO-Konzentration. Mit Hilfe der installierten Thermoelemente war eine erste Abschätzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront möglich. Diese änderte sich von 0.77 mm/min ($A_0 = 0 \text{ mm}^2$) auf 2.05 mm/min bei der maximalen Lufteintrittsfläche.

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, Armaturen und Forschung Gasanwendung. Hauptaugenmerk liegt auf der Prüfung von Gasgeräten und Bauteilen in der Gasversorgung und Komponenten für Gasgeräte. Der Bereich Forschung gewinnt durch die Energiewende zunehmend an Gewicht und bestreicht auch die Prüfbereiche. Christof Weis wechselte 2024 zur DVGW-Forschungsstelle und übernimmt dort die Position des Gruppenleiters Forschung und Entwicklung. Mit seiner Erfahrung und Expertise wird er die Forschungsaktivitäten der DVGW-Forschungsstelle weiterentwickeln und neue Lösungen für die Energiewende entwickeln. Nachfolgend wird ein Rückblick auf 2024 aus Sicht der Prüfung und Forschung gegeben.

Abteilung Gasanwendung - Allgemein

Das Jahr 2024 stand weiterhin ganz im Zeichen der Energiewende und der damit verbundenen Unsicherheit. Viele Hersteller stellten neue Projekte zurück. Dennoch ist es durch den Einsatz aller Mitarbeiter gelungen die Auftragslage stabil zu halten. Hilfreich hierzu war unser regelmäßiger Kontakt zu den Herstellern vor allem durch die Besuche vor Ort durch unsere Überwachungstätigkeit.

Dies ist umso bemerkenswerter, da in den Prüfbereichen Verbrennungstechnik, Armaturen und ETEC gleichzeitig noch viele Personalwechsel zur Herausforderung gehörten und in 2025 durch den Renteneintritt von einigen Mitarbeitern auch bleiben wird.

Letztendlich bleibt aber festzuhalten, dass durch gutes Teamwork die Herausforderungen der Energiewende und der Neuaufstellung im Bereich Personal sehr gut bewerkstelligt werden konnte.

Wir blicken gespannt weiterhin voraus in das Jahr 2025, welches auch durch die Neuwahlen des Bundestages sicherlich noch viele Überraschungen im Energiesektor bereithalten wird. Darüber hinaus wird der Bereich Gasanwendung umstrukturiert, um für die Herausforderungen in der Zukunft gewappnet zu sein.

Weiterhin wird es aber so sein, dass es dem Prüflabor möglich ist, Prüfungen aller Komponenten und Materialien sowie Sicherheitseinrichtungen, der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischer Phänomene im Komplettpaket durchzuführen.

Die Kompetenzen des Prüflaboratoriums (gestützt durch die intensive Teilnahme an der Gesetzgebung und die Kooperation mit zahlreichen europäischen Stellen) ermöglichen die erfolgreiche Anwendung von Prüfverfahren für neue Technologien im Hinblick auf Energieeffizienz und Sicherheitstechnik unterschiedlicher Brennstoffanwendungen.

Abteilung Gasanwendung – Normung und Standardisierung

Auch im zurückliegenden Jahr setzten sich die Mitarbeiter/innen des Prüflaboratoriums im Rahmen der Gesetzgebung, neben den DVGW-internen Gremien und Ausschüssen, vor allem auch in nationalen (ca. 35 Ausschüsse in NAGas, NHRS, FNH, DKE), europäischen (CEN, CENELEC, EU-Kommission) und internationalen (IEC, ISO) Gremien (25 europäische und internationale Gremien zzgl. Arbeitsgruppen) für die Ziele des

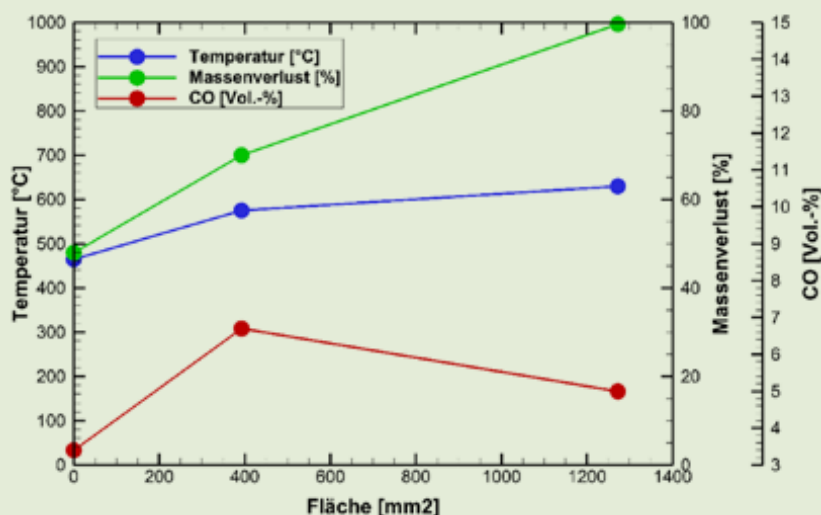


Bild 2.17: Abhängigkeiten von Temperatur, Massenverlust und CO-Emission von der Lufteintrittsfläche

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) umzusetzen. In vielen Technischen Komitees des CEN (z. B. TC 58, TC 69, TC 109, TC 234, TC 235, TC 236) wurde damit begonnen, Anforderungen und Prüfmethoden zur Wasserstoffeignung der Bauteile und Geräte auszuarbeiten. Der systematische Ausbau der H₂-Kompetenz im DVGW und damit der nationalen und europäischen Normung wird auch durch ein Investitionsprogramm unterstützt. Die Mitarbeiter der Prüfstelle haben weiterhin die Entwicklung von Zertifizierungsprogrammen (ZP's) der DVGW CERT GmbH aktiv unterstützt. Entsprechende 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 eingesetzt.

In der Normungsarbeit sind alle wichtigen Technischen Ausschüsse (TK's) des DVGW durch Mitarbeiter der Forschungsstelle besetzt und darüber wurde Herr Dr. Jens Hoffmann in das neue übergeordnete Querschnittsgremium „Technical Coordination Board“ des DIN entsandt. Auch in einigen anderen exponierten Stellen belegen Prüfstellenmitarbeiter auch Positionen im Vorsitz der Gremien.

Weiterhin wurde Herr Jörg Endisch für seine Arbeit im IEC („International Electrotechnical Commission“) persönlich mit dem „IEC 1906 Award“ ausgezeichnet (Bild 2.18).

Abteilung Gasanwendung – Prüftätigkeiten

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

In Zuge der zunehmenden Aktivitäten und Herausforderungen in der Gaswelt wurden zahlreiche Heizgeräte mit wasserstoffhaltigen Gemischen geprüft. Auch im Rahmen der Gasgerätearmaturen konnte eine Zunahme der Projekte bzgl. der Anwendung von Wasserstoff festgestellt werden. Bei den Armaturen für Gasverteilungssysteme sind die verschiedenen Hersteller jedoch noch abwartend bzgl. der Prüfungen mit Wasserstoff und warten auf die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse aus den verschiedenen Forschungsprojekten, wie z. B. dem DVGW Projekt ECLHYPSE und deren Umsetzung in den Zertifizierungsprogrammen und nationalen und europäischen Normen.

Der Fachbereich verbrennungstechnische Prüfungen wurde bedarfsgerecht neu aufgestellt und die Umsetzung der anstehenden Prüftätigkeiten und Einstellung auf die veränderte Energie- und Heizungswelt eingestellt.

Im Bereich der Armaturen und Elektrotechnik/Sicherheitseinrichtungen wurden die Prüftätigkeiten trotz stark veränderter Umstellungen in der Industrie mit abnehmendem Potenzial kontinuierlich aufrecht gehalten. Nachfolgend eine Übersicht über Normen, deren Übergangsfrist im Jahr 2025 enden.

Prüfung von Regel- und Sicherheitseinrichtungen für Gasbrenner:

Die folgenden Normen für Regelungs- und Sicherheitseinrichtungen für Gasbrenner wurden kürzlich aktualisiert. Im Fall von z. B. Steuerungsautomaten besteht noch eine Übergangsfrist bis November 2025. Wir empfehlen, den Status bestehender CE-Zertifizierung zu überprüfen und zu aktualisieren.

- EN 161:2022 Automatische Absperrventile für Gasbrenner und Gasgeräte
- EN 298:2022 Feuerungsautomaten für Brenner und Brennstoffgeräte für gasförmige oder flüssige Brennstoffe
- EN 12067-2:2022 Gas-Luft-Verbundregeleinrichtungen für Gasbrenner und Gasgeräte, Teil 2: Elektronische Ausführung.
- EN 16678:2022 Sicherheits- und Regeleinrichtungen für Gasbrenner und Gasbrennstoffgeräte - Automatische Absperrventile für einen Betriebsdruck über 500 kPa bis einschließlich 6300 kPa
- EN 125:2022 Thermoelektrische Zündsicherungen



Bild 2.18: IEC 1906 Award für Jörg Endisch

- EN 1106:2022+A1:2023 Handbetätigte Einstellgeräte für Gasgeräte
- EN 1643:2022 Ventilüberwachungssysteme für automatische Absperrventile
- EN 88-1:2022+A1:2023 Sicherheits- und Regeleinrichtungen für Gasbrenner und Gasgeräte - Teil 1: Druckregler für Eingangsdrücke bis einschließlich 50 kPa
- EN 88-2:2022 Sicherheits- und Regeleinrichtungen für Gasbrenner und Gasgeräte - Teil 2: Druckregler für Eingangsdrücke über 50 kPa bis einschließlich 500 kPa
- EN 88-3:2022 Druck- und/oder Durchflussregler für Eingangsdrücke bis einschließlich 500 kPa, elektronische Ausführung

Viele Hersteller, welche Baumuster-Prüfungen für bestehende Zertifizierungen in unserem Haus haben durchführen lassen, wurden sensibilisiert und haben notwendige Ergänzungsprüfungen in unseren Laboren beauftragt, um daraufhin eine Aktualisierung Ihrer Zertifikate zu erwirken.

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.

Elektrotechnik

Im Bereich „Automatische elektrische Regel- und Steuereinrichtungen“ (DKE/K515, IEC TC 72) wurde die Basis-Norm IEC 60730-1 (betrifft viele Steuerungen in der Gasbranche und weißen Ware), grundlegend revidiert und mit IEC 60730-1:2022-09 (ed.6) umgesetzt wurde. Weitere Teile 2 (z. B. 60730-2-5, Feuerungsautomaten) sind in den letzten Abschnitten der Bearbeitung zur Anpassung an die neue Struktur enthalten. Damit ergeben sich in nächster Zeit Bedarfe, die Konformitätsbetrachtung von elektronischen Produkten neu zu bewerten. Im Bereich der Normung der elektrischen Ausrüstung von Gasgeräten wurde die in vielen Gasgerätennormen angewendete Norm EN IEC 60335-2-102:2024 sowie europäische Anpassungen EN IEC 60335-2-102:2024/A11:2024 bereits im August ratifiziert, ohne Bezug zu den europäischen Richtlinien.

Abteilung Gasanwendung – Forschung

Abtrennung von CO₂ und H₂ aus Prozessgasen: MemKoWi

Im Rahmen des im November 2022 gestarteten BMWK-Projekts sollen Membranen zur Abscheidung von CO₂ und H₂ aus Rauch- und Prozessgasen der Industrie erforscht und entwickelt werden. Das DVGW-EBI charakterisiert zusammen mit dem Projektkoordinator Hereon und dem FZJ Polymer- und keramische Membrane mit Modellgasgemischungen (v.a. mit Permeationsmessungen auf einem selbst entwickelten Prüfstand). Dabei handelt es sich um tubulare Keramikmembrane sowie flache Polymermembrane. Durchgeführt wurden Bestimmungen der Permeabilität und Selektivität für Rein- und Binärgasgemische. Dabei reicht der Temperaturbereich bis 70 °C für die Polymer- und bis 200 °C für die Keramikmem-

brane bei einem Transmembrandruck von 0,5-3 bar. Die Ergebnisse deuten auf eine hohe Selektivität der Membranen für die jeweilige Zielkomponente hin. Weiterhin gibt es Hinweise auf eine steigende Effektivität der Keramikmembran mit steigender Temperatur und größerem Druck, während bei Polymermembranen klare Vorteile bei niedrigeren Temperaturen abzusehen sind. Die daraus erhaltenen Membrandaten fließen in die Entwicklung eines eigenen CFD-Modells ein. Das Projekt soll bis Mitte 2026 laufen.

Umstellung der Gasinfrastruktur: TrafoHyVE

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

In 2024 wurde die Ergänzung der Inventarisierungsliste durch die geltenden Regelwerke im Rahmen einer Aufgabenübernahme von der DVGW CERT GmbH (CERT) abgeschlossen. Die Prüf- und Zertifizierungsgrundlagen sowie rechtliche Grundlagen konnten für die Komponenten und Materialien der Inventarisierungsliste herausgesucht und analysiert werden.

Um die H₂-Eignung der im Verteilnetz verbauten Materialien zu beurteilen, konnte gezeigt werden, dass die Prüfgrundlagen zu Materialien nicht direkt verwendet werden können, da sie grundsätzlich zu diesem Zweck nicht angeordnet sind. Grund dafür ist, dass dabei in den meisten Fällen keine gasartenabhängige Prüfung – in dem Fall H₂-Prüfung – vorgesehen ist. Aus diesem Grund wurden weitere Quellen, wie z. B. Berichte aus DVGW-Forschungsprojekten verwendet, um einen lückenlosen Nachweis der H₂-Eignung aller ausreichend definierten, innerhalb der Inventarisierungsliste aufgeführten Materialien zu erreichen. Für die nicht ausreichend definierten Materialien, wie z. B. Grauguss-Varianten wurden Handlungsempfehlungen ausgesprochen.

Auf der Komponenten-Ebene konnten auf Basis der genannten Regelwerksarbeiten die Prüfstandsuntersuchung der Bestandskomponenten durchgeführt werden. Auf Grundlage des Auswahlprozesses bezüglich der sechs gewünschten Testkomponenten, konnten die Netzbetreiber die folgenden vier Testkomponenten aus dem Bestandsnetz zur Verfügung stellen: Hauseinführungskombination, Schieber, Ventilbohrarmatur und Stahl-Kugelhahn. Diese wurden am EBI-Prüfstand erfolgreich auf ihre Wasserstofftauglichkeit bezüglich äußerer und innerer Dichtigkeit geprüft, wie in **Bild 2.19** dargestellt ist:

Komponente	Prüfdruck	Prüfling verfügbar	Status
Hauseinführungskombination	50 mbar	Ja	Mit N ₂ und H ₂ erfolgreich auf Dichtigkeit geprüft.
Schieber DN 100	16 bar	Ja	Mit N ₂ und H ₂ erfolgreich auf Dichtigkeit geprüft.
Ventilanbohrarmatur	50 mbar	Ja	Mit N ₂ und H ₂ erfolgreich auf Dichtigkeit geprüft.
Kugelhahn Stahl	50 mbar	Ja	Mit N ₂ und H ₂ erfolgreich auf Dichtigkeit geprüft.
Kugelhahn PE	-	Nein	Kein Prüfling vorhanden.
Absperrventil	-	Nein	Kein Prüfling vorhanden.



Bild 2.19: Ergebnisse der Druckabfall-Messungen des DVGW-Projekts TrafoHyVe, Quelle DVGW-EBI

Die praktischen Arbeiten im Projekt wurden im Jahr 2024 beendet, der Abschlussbericht wird aktuell fertig gestellt.

NETZlabor H₂-100 Öhringen

In Öhringen ist die Umstellung von zwei Gebäuden auf eine Versorgung mit reinem Wasserstoff für einen Zeitraum von zwei Monaten beabsichtigt. Von der Forschungsseite begleitet wurden dabei die Vorbereitungen mit Fokus auf die Komponenten der Installation im Hinblick auf ihre Wasserstofftauglichkeit. Im Januar 2025 erfolgte die erfolgreiche Begleitung der Umstellung sowie des Betriebes durch Emissionsmessungen an Geräten und in den Gebäuden. Dabei konnte ein sicherer Betrieb der Gasinstallation inklusive Brennwertgeräten und Kesselfeuerung nachgewiesen werden.

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

In RAWENI beabsichtigen die DVGW-Forschungsstelle am EBI mit dem GWI und DBI technisch-wissenschaftliche Erkenntnisse zu Fragestellungen in Bezug auf die direkte energetische industrielle Anwendung von Ammoniak zu erzielen.

Im Fokus stehen dabei:

- Eine Metastudie zur Identifikation von Potenzial und Relevanz der direkten energetischen Anwendungen von NH₃ in der Industrie für den DVGW.
- Die Durchführung von technischen Untersuchungen zur NH₃-Verbrennung im Labor- und Industriemaßstab.
- Die Ableitung eines Beitrags zur Erweiterung des DVGW-Regelwerks bzgl. der direkten energetischen indus-

triellen Anwendungen von NH₃ auf Basis von NH₃-Normen und Regelwerken.

Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete unterteilt, wobei die Koordination und Leitung von drei Arbeitspaketen am EBI verortet sind. Das Projekt ist im Oktober 2024 gestartet. Im Vorfeld wurde in Kooperation mit der Abteilung Verbrennungstechnik ein Ammoniaklabor eingerichtet. In diesem lassen sich in sicherer Umgebung mit moderner Technik atmosphärische Ammoniakbrenner betreiben. Die Verbrennungsvorgänge werden dann mittels laseroptischer Messtechnik sowie Abgasanalyse im Detail untersucht. Dafür kommen kommerzielle erdgasbetriebene Brenner für unterschiedliche industrielle Anwendungen auf den Prüfstand.

2.6 Veröffentlichungen in peer-reviewed Fachjournalen und Buchbeiträge

- [1] Dinkov, I., Braun, J.H., Schelb, D., 2024. Hydrogen in the Natural Gas Network—Relevance for Existing Fire Precautions. *Fire* 7, 189. <https://doi.org/10.3390/fire7060189>
- [2] Ghasemi, A., Christou, T., Kok, J.B.W., Stelzner, B., Zarzalis, N., 2023. Combustion dynamics analysis of a pressurized airblast swirl burner using proper orthogonal decomposition. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*. <https://doi.org/10.1177/17568277231207252>
- [3] Horn, H., Kolb, T., Rauch, R., Stein, O.T., Trimis, D., Wolf, M., 2024a. Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2023, Teil 1. GWF, Gas + Energie.
- [4] Horn, H., Kolb, T., Rauch, R., Stein, O.T., Trimis, D., Wolf, M., 2024b. Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2023, Teil 2. GWF, Gas + Energie.
- [5] Horn, H., Kolb, T., Rauch, R., Stein, O.T., Trimis, D., Wolf, M., 2024c. Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2023, Teil 3. GWF, Wasser - Abwasser.
- [6] Kalbhor, A., Schmitz, R., Ramirez, A., Vlavakis, P., Hagen, F.P., Ferraro, F., Braun-Unkloff, M., Kathrotia, T., Riedel, U., Trimis, D., van Oijen, J., Hasse, C., Mira, D., 2024. Experimental and numerical investigation on soot formation and evolution of particle size distribution in laminar counterflow ethylene flames. *Combustion and Flame* 260, 113220. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.113220>
- [7] Kaleris, K., Hatziantoniou, P., Stelzner, B., Trimis, D., 2024. Laser-sound reproduction by pulse amplitude modulation audio streams. *Scientific Reports* 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62382-8>
- [8] Luu, T. D., Shamooni, A., Kronenburg, A., Braig, D., Mich, J., Nguyen, B.-D., Scholtissek, A., Hasse, C., Thäter, G., Carbone, M., Frohnapfel, B., Stein, O.T., 2024. Carrier-phase DNS study of particle size distribution effects on iron particle ignition in a turbulent mixing layer. *Proceedings of the Combustion Institute* 40, 105297. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105297>
- [9] Luu, Tien Duc, Shamooni, A., Kronenburg, A., Braig, D., Mich, J., Nguyen, B.-D., Scholtissek, A., Hasse, C., Thäter, G., Carbone, M., Frohnapfel, B., Stein, O.T., 2024a. Carrier-phase DNS of ignition and combustion of iron particles in a turbulent mixing layer.
- [10] Luu, Tien Duc, Zhang, J., Gärtner, J.W., Meng, S., Kronenburg, A., Li, T., Løvås, T., Stein, O.T., 2024b. Single particle conversion of woody biomass using fully-resolved and Euler-Lagrange coarse-graining approaches. *Fuel* 368, 131600. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131600>
- [11] Meier, R., Zirwes, T., Zhang, F., Bockhorn, H., Oliveira, A.A.M., 2024. Numerical investigation of unsteady flame propagation assisted by low-temperature chemistry. *Fuel* 364, 130895. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130895>
- [12] Schelb, D., Dinkov, I., 2024. Untersuchung von Wasserstoff-Freisetzungen in teilverbauten Räumen. *BRANDSchutz* 78, 736–749.
- [13] Sebbar, N., Bockhorn, H., Trimis, D., 2023. Oxidation of the 1-naphthyl radical C 10 H 7 • with oxygen: Thermochemistry, kinetics, and possible reaction pathways. *Int. J. Chem. Kinet.* <https://doi.org/10.1002/kin.21702>
- [14] Shamma, M., Harth, S., Trimis, D., 2024. Experimental investigation of multi-burner array with lean lifted spray flames in inline and inclined configurations. *Applications in Energy and Combustion Science* 17, 100246. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2024.100246>
- [15] Shamooni, A., Wen, X., Debiagi, P., Stagni, A., Gärtner, J.W., Zirwes, T., Stein, O.T., Hasse, C., Kronenburg, A., 2024. Carrier-phase direct numerical simulation and flamelet modeling of alkali metal emissions from pulverized biomass flames. *Proceedings of the Combustion Institute* 40, 105309. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105309>
- [16] Thäter, G., Carbone, M., Luu, T.-D., Stein, O.T., Frohnapfel, B., 2024. The influence of clustering in homogeneous isotropic turbulence on the ignition behavior of iron particles. *Proceedings of the Combustion Institute* 40, 105348. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105348>
- [17] Weinbrecht, P., Stelzner, B., Habisreuther, P., Weis, C., Trimis, D., 2024. Experimental investigation of irradiance from combustion in porous media with different geometries. *Applications in Energy and Combustion Science* 20, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2024.100294>
- [18] Weis, C., Sentko, M.M., Stelzner, B., Habisreuther, P., Zarzalis, N., Trimis, D., 2024. Experimental and numerical investigations of the laminar burning velocities of premixed fuel-rich methane oxy-fuel and oxygen-enhanced flames. *Fuel* 368, 131601. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131601>
- [19] Wen, X., Shamooni, A., Stein, O.T., Tainaka, K., Meller, D., Kronenburg, A., Kempf, A.M., Hasse, C., 2024a. A four-fuel-stream flamelet model for large-eddy simulation of piloted pulverized coal/ammonia co-combustion. *Proceedings of the Combustion Institute* 40, 105470. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105470>
- [20] Wen, X., Shamooni, A., Zirwes, T., Stein, O.T., Kronenburg, A., Hasse, C., 2024b. Carrier-phase direct numerical simulation and flamelet modeling of NO_x formation in a pulverized coal/ammonia co-firing flame. *Combustion and Flame* 269, 113722. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113722>
- [21] Werzner, E., Mendes, M.A.A., Demuth, C., Trimis, D., Ray, S., 2024. Simulation of Fluid Flow, Heat Transfer and Particle Transport Inside Open-Cell Foam Filters for Metal Melt Filtration, in: Aneziris, C.G., Biermann, H. (Eds.), *Multifunctional Ceramic Filter Systems for Metal Melt Filtration: Towards Zero-Defect Materials*. Springer International Publishing, Cham, pp. 301–333. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40930-1_13
- [22] Yang, L., Wang, Y., Zirwes, T., Zhang, F., Bockhorn, H., Chen, Z., 2024. Effects of Intrinsic Instabilities on the Response of Premixed Hydrogen/Air Conical Flames to Inlet Flow Perturbations. *Flow Turbulence Combust.* <https://doi.org/10.1007/s10494-024-00535-5>
- [23] Zhang, F., Cao, J., Zirwes, T., Netsch, N., Tavakkol, S., Zhang, R., Bockhorn, H., Stapf, D., 2024. Numerical Simulation of Thermal Decomposition of Polyethylene with a Single-Particle Model, in: Benim, A.C., Bennacer, R., Mohamad, A.A., Ochoa, P., Suh, S.-H., Taler, J. (Eds.), *Advances in Computational Heat and Mass Transfer*. Springer International Publishing, Cham, pp. 180–191. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67241-5_17
- [24] Zhang, F., Tavakkol, S., Dercho, S., Zhou, J., Zirwes, T., Zeller, M., Vogt, J., Zhang, R., Bockhorn, H., Stapf, D., 2024. Assessment of dynamic characteristics of fluidized beds via numerical simulations. *Physics of Fluids* 36, 023348. <https://doi.org/10.1063/5.0189519>
- [25] Zirwes, T., Eckart, S., Zhang, F., Kaiser, T.L., Oberleithner, K., Stein, O.T., Bockhorn, H., Kronenburg, A., 2024. Structure and dynamics of hexagonal cells in H₂/CO₂ flames. *Proceedings of the Combustion Institute* 40, 105332. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105332>
- [26] Zirwes, T., Zhang, F., Kaiser, T.L., Oberleithner, K., Stein, O.T., Bockhorn, H., Kronenburg, A., 2024. The role of thermodiffusion and dimensionality in the formation of cellular instabilities in hydrogen flames. *Proceedings of the Combustion Institute* 40, 105665. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105665>

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

Harald Horn, Andrea Hille-Reichel, Florencia Saravia

3.1 Forschung und Lehre

Forschung

2024 wurde das durch die EU und das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg geförderte Projekt KoalAplan erfolgreich abgeschlossen. Auf dem Lehr- und Forschungsklärwerk der Universität Stuttgart in Büsnau konnte eine Prozesskaskade im Pilotmaßstab installiert werden, bei der aus den organischen Feststoffen zunächst mit einer Hydrolyse organische Säuren in einer hochkonzentrierten, feststofffreien Lösung gewonnen werden konnten. Daraus wurde in weiteren Prozessschritten Wasserstoff und Bioplastik produziert. Eine Broschüre kann auf dem Internetauftritt von Umwelttechnik BW bestellt werden (<https://www.umwelttechnik-bw.de/de/biooekonomie-abwasser>). Darüber hinaus kann dort ein Motivationsfilm mit den wesentlichen Elementen der Reaktorkaskade angeschaut werden (<https://www.umwelttechnik-bw.de/de/koalapan>). Ein Highlight im letzten Jahr war ohne Zweifel der Besuch des Ministerpräsidenten im Rahmen von KoalAplan (Bild 3.1). Ministerpräsident Kretschmann hatte sich sehr viel Zeit genommen, um sich die einzelnen Schritte der Prozesskaskade auf dem Forschungsklärwerk erklären zu lassen.

Das BMBF-Projekt BROWSE (Reaktionskaskaden zur Produktion von Biopolymeren aus Abfallströmen) bei dem am Engler-Bunte-Institut aus Hydrolysat Butandiol produziert wurde, konnte im Jahr 2024 mit der erfolgreichen Weiterentwicklung des Membranbiofilmreaktors (MBfR) abgeschlossen werden. Butandiol wurde anschließend von einem Projektpartner zu Polymeren weiterverarbeitet. Der neue MBfR verfügt jetzt über eine deutlich größere Membranfläche pro Reaktorvolumen. Mittelfristiges Ziel ist es, diesen Reaktortyp im Pilotmaßstab für die Fermentation mit gasförmigen Substraten (Wasserstoff, Kohlendioxid) einzusetzen.

Sehr viel Aktivität ist in die Produktion von Wasserstoff aus biologisch gereinigtem Abwasser geflossen. Dabei lag der Fokus zum einen auf der Herstellung von ultrapure water (UPW) für die Elektrolyseure und zum anderen auf der Nutzung des Beiprodukts Sauerstoff für die Belüftung des Belebungsbeckens.

Generell ist die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut in den letzten Jahren sehr stark in die Nutzung und Aufbereitung von Wasser rund um die Wasserstofferzeugung und die weitere Herstellung von chemischen Energieträgern (Methanol, Methan, Fischer-Tropsch) involviert. Lange wurden die Anforderungen an die Wasserqualität im Elektrolyseur, der Bedarf an Kühlwasser und der Anfall von Abwasser bei der Power-to-X Synthese unterschätzt. Der

Aufwand ist erheblich, die notwendigen Verfahren stehen aber ohne Zweifel zur Verfügung. Viele der Fragen werden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „PtX-Wind – Offshore Power-to-X-Prozesse, Technologieplattform H₂Mare“ bearbeitet, das noch bis zum Ende des Jahres 2025 läuft.

Auf den nächsten Seiten finden Sie zwei ausführlichere Berichte zu Projekten im Themenfeld „Wasserstofferzeugung aus biologisch gereinigtem Abwasser“ und „Wetting bei der Membrandestillation“ sowie den Bericht zu einer abgeschlossenen Promotionsarbeit. Die Tabelle 3.1 in Kap. 3.2 zeigt ebenfalls alle Projekte, die im laufenden Berichtsjahr 2024 abgeschlossen, fortgeführt oder neu eingeworben wurden.

Lehre

Im Studiengang Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik (CIW) haben sich im WS 24/25 nunmehr 114 Bachelor- und 87 Masterstudierende immatrikuliert (WS23/24: 111 für CIW-Bachelor). Die Zahlen im Bioingenieurwesen (BIW) bleiben im WS 24/25 niedrig, 50 Bachelor- und 17 Masterstudierende (WS 23/24: 73 für BIW-Bachelor).

Der englischsprachige Master-Studiengang „Water Science and Engineering“ (WSE) verzeichnet dagegen eine stetig steigende Anzahl von Bewerbungen (siehe Bild 3.2), in der Regel werden aber nur 20 bis 30 Studierende pro Studienjahr immatrikuliert. Die Zulassung ist mit Interviews verbunden, die mit einem Teil der Bewerber:innen geführt werden. Unstrittig ist, dass auf der einen Seite das Angebot eines englischsprachigen Studiengangs die Attraktivität der Hochschule erhöht. Andererseits ist es mit einem erheblichen Aufwand verbunden, die geeigneten Kandidaten:innen herauszusuchen.

In den Masterstudiengängen ist das Interesse der Studierenden am Profil A (Water Technologies and Urban Water Cycle) mit den Veranstaltungen „Water Technology“, „Membrane Technology in Water Treatment“, „Fundamentals of Water Quality“ und „Industrial Wastewater Treatment“ sehr groß. Die hohe Beteiligung an den Veranstaltungen spiegelt sich auch in der großen Nachfrage an experimentellen Masterabschlussarbeiten wider. Im Jahr 2024 konnten insgesamt 20 Arbeiten abgeschlossen werden (vier Bachelorarbeiten, zwei Study-Projektarbeiten, 14 Masterarbeiten).

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

Internationale Kooperationen in Forschung und Lehre

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 untersuchte in den letzten Jahren den Verbleib von Neonicotinoiden in der Umwelt.

Willow Neske von der Temple University arbeitete bis zum Sommer 2024 im Rahmen eines Fulbright-Stipendiums zur Thematik Abwasserwiederaufbereitung und erneuerbare Energien am Engler-Bunte-Institut. Sie ist jetzt Doktorandin an der Cornell University.

Dr. **Luis Pino Soto** von der Universidad de Concepción in Chile war für einen Forschungsaufenthalt am Engler-Bunte-Institut. Er beschäftigt sich mit der Wiederverwendung von Membranmaterialien, die in den nächsten Jahren in sehr großem Umfang durch zu ersetzende Membranmodule anfallen werden.

Promotionen

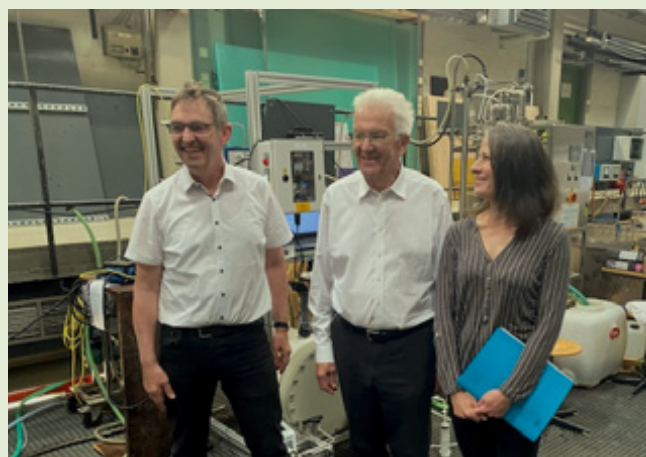
2024 wurde eine Promotion fertiggestellt, im Folgenden ist das Ergebnis der Arbeit kurz zusammengefasst.

Im Dezember 2024 verteidigte Herr M. Sc. **Stephan Zimmermann** seine Dissertation „Oxidative Transformation von Krebsmedikamenten in der wässrigen Phase“. Zweitgutachterin war die Kollegin Prof. Julia Bornhorst von der Bergischen Universität in Wuppertal.

Der Eintrag von pharmazeutischen Wirkstoffen und anderen anthropogenen Mikroschadstoffen in die Oberflächengewässer ist in den letzten zwei Jahrzehnten intensiv diskutiert und zum Teil auch reguliert worden. Dabei ist die Diversität der Stoffe erheblich, was auch Konsequenzen im Hinblick auf die biologische Abbaubarkeit hat. Letztere ist eine notwendige Voraussetzung für die Entfernung dieser Stoffe in kommunalen Kläranlagen. Auf Grund des chemischen Designs der pharmazeutischen Wirkstoffe reicht die biologische Stufe in Kläranlagen in der Regel nicht aus. Wegen eben dieser Eigenschaft sind adsorptive Verfahren der Wasseraufbereitung zum Teil nicht effizient. Oxidative Verfahren sind dann oft die einzige Möglichkeit für die Entfernung der Mikroschadstoffe.

Herr Stephan Zimmermann hat im Rahmen seiner Dissertation die oxidative Behandlung von drei Krebsmedikamenten untersucht. Für die drei Wirkstoffe Capecitabin (CAP), Bicalutamid (BIC) und Irinotecan (IRI) lagen zu Beginn der Promotionsarbeit von Herrn Zimmermann nur unzureichende Daten im Hinblick auf ihre Abbaubarkeit durch oxidative Verfahren vor. Herr Zimmermann zeigt, dass die „predicted no-effect concentrations“ (PNEC) für CAP deutlich und für BIC knapp oberhalb der zurzeit bekannten Konzentrationen in Oberflächengewässern liegen. Für IRI ist das nicht bekannt. Zwei Verfahren wurden für die Elimination ausgewählt, die Photolyse und der Einsatz von Ozon für die Oxidation.

Darüber hinaus hat Herr Zimmermann drei Monate an der Universität UniLaSalle in Bruz, Frankreich, verbracht, um dort die Ökotoxizität seiner behandelten Proben mit Daph-



Quelle: Harald Schönberger

Bild 3.1: Besuch des MP am 6. Juni 2024 (v.r.n.l. Andrea Hille-Reichel, Winfried Kretschmann, Harald Horn)

nia magna, dem Comet-Assay mit Muschelzellen und dem (MTT)-Test in Zellkulturen zu bestimmen. Hier hatte er sich bewusst dafür entschieden, den relevanten Konzentrationsbereich zu testen und die Konzentrationen nicht höher zu setzen, um einen Effekt zu provozieren.

Herr Zimmermann führte verschiedene Eliminationsexperimente bei unterschiedlichen Konzentrationen durch. Höhere Konzentrationen wurden gewählt, um den tatsächlichen Abbau des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) untersuchen zu können. Darüber hinaus wurden auch Versuche mit gespiktem, biologisch gereinigtem Abwasser durchgeführt. Alle drei Substanzen lassen sich unter den gewählten Bedingungen der Photolyse in Reinstwasser in einem Zeitfenster unter einer Stunde und bei 1 µg/L Ausgangskonzentration gut abbauen. Herr Zimmermann bildet das mit den Reaktionskonstanten zweiter Ordnung und den Quantenausbeuten ab. Letzteres ist wichtig, da nur so eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Versuchssysteme möglich ist.

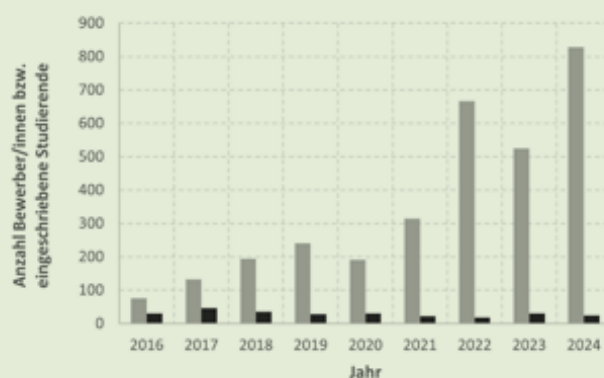


Bild 3.2: Anstieg der Bewerberzahlen (grau) für das Masterprogramm „Water Science and Engineering“ seit der Einrichtung des Studiengangs. Zusätzlich sind die tatsächlich eingeschriebenen Studierenden (schwarz) gezeigt.

Tabelle 3.1: In Arbeit befindliche, im Jahr 2024 abgeschlossene* und neu begonnene Forschungsprojekte.

Schwerpunkt	Projektmitarbeitende	Thema	Förderung
Wasserqualität	Steffen Hertle (externer Doktorand)	Aerob metabolischer Chlorethenabbau in kontaminiertem Grundwasser	DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW)
	Lukas Lesmeister (externer Doktorand)	Aufbereitungsverfahren zur Entfernung kurzketziger per- und polyfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) aus Trinkwasser und Membrankonzentrationen	TZW
	Tim Schwarzenberger (externer Doktorand)	Verifizierung und Optimierung eines kombiniert variablen Ansatzes zur mikrobiologischen Validierung von mono- und polychromatischen UV-Systemen	TZW
	Stephan Zimmermann	Verhalten von Krebsmedikamenten bei Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung*	KIT
Wassertechnologie	Mina Ahsani Florenca Saravia	Entwicklung eines Überwachungssystems für eine effiziente Erkennung von Biofouling in Umkehrosmose-Anlagen	ZIM-Kooperationsprojekte / BMBK
	Mehran Aliaskari Yair Morales Michael Wagner Ben Schädlich Sophie Oeppling Jonas Ullmann Florenca Saravia	PtX-Wind – Offshore Power-to-X-Prozesse, Technologieplattform H2Mare (Verbundvorhaben)	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
	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 Landesgraduiertenförderung
	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 Landesgraduiertenförderung (LGF); KIT
	Yair Morales Florenca Saravia	Transferwind-H2Mare – Forschungs-Transfer, Technologieplattform H2Mare (Verbundvorhaben)	BMBF
	Alina Schlosser Florenca Saravia	Thermlon: Extraktion von Lithium aus thermalen Solen (Verbundvorhaben)	Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz (BMBK)
	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 (KA4H2) (Verbundvorhaben)	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
	Jan Singer Yair Morales Florenca Saravia	H2ZVK - Integrale H ₂ -Machbarkeitsstudie am Standort Klärwerk Steinhäule	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Der Abbau der drei Substanzen mit Ozon bei derselben Ausgangskonzentration ist sehr unterschiedlich. Während IRI und CAP sehr schnell abgebaut werden, wird die Konzentration von BIC durch den Zusatz von Ozon kaum beeinflusst. Herr Zimmermann kann das zum Teil mit den chemischen Strukturen der beiden abbaubaren Substanzen im Vergleich zu IRI beschreiben.

Ein Vergleich mit einigen „Standard“-Mikroschadstoffen zeigt, dass die Quantenausbeuten zum Teil deutlich kleiner sind als solche für z. B. Diclofenac, Ibuprofen oder Sulfamethoxazol. Dies wird von Herrn Zimmermann sehr schön diskutiert und entsprechend eingeordnet.

Die Versuche zur Mineralisation zeigen, dass bei der Photolyse der Abbaugrad des DOC deutlich höher ist als beim Einsatz

Schwerpunkt	Projektmitarbeitende	Thema	Förderung
Biologische Abwasserreinigung	Szilárd Bucs	Visualisierung und Bildanalyse von Biofilmen in verschiedenen Umgebungen, Computergestützte Strömungsdynamik und multiphysikalische Modellierung*	Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts, BMBF, KIT
	Andreas Netsch Michael Wagner	Entwicklung und Demonstration einer energieeffizienten bioelektrochemischen Abwasserbehandlung im technischen Maßstab mit Einhaltung gesetzlicher Anforderungen zur Ablaufqualität (Demo-BioBZ; Verbundprojekt)	BMBF
	Nikhil Shylaja Prakash Andrea Hille-Reichel	Kommunales Abwasser als Quelle für Ammoniumstickstoff, Wasserstoff und Bioplastik – die Bioraffinerie Büsnau (KoalAplan; Verbundprojekt)*	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, kofinanziert von der Europäischen Union
Biologische Grenzflächen	Süheyla Duran Andrea Hille-Reichel	Anwendung von Membranbiofilmreaktoren für die biotechnologische Produktion von Plattformchemikalien	The Republic of Türkiye Ministry of National Education, KIT
	Maximilian Miehle Andrea Hille-Reichel	Skalierbarkeit von Gasfermentationsprozessen in Membranbiofilmreaktoren	MWK
	Willow Neske Andrea Hille-Reichel	Abwasserwiederaufbereitung und erneuerbare Energie in Deutschland*	Fulbright-Stipendium, Temple University; KIT
	Max Rümenapf Andrea Hille-Reichel	Etablierung eines kohlenstoffdioxid- und glukosebasierten Verfahrens zur Herstellung von 2,3-Butandiol mithilfe eines membrangebundenen Biofilms aus zwei bakteriellen Spezies	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
	Zhizhao Xiao Andreas Netsch Andrea Hille-Reichel	Reaktionskaskaden zur Produktion von Biopolymeren aus Abfallstoffströmen (BROWSE; Verbundprojekt)*	BMBF
	Zhizhao Xiao Andrea Hille-Reichel	Skalierbarkeit mikrobieller (Einkammer-) Elektrolysezellen für die Nutzung von Abfallstoffströmen	KIT

von Ozon. Auch wenn diese Versuche wegen der DOC-Analytik bei deutlich (1.000-fach) höheren Konzentrationen durchgeführt wurden, sind sie für die finale Wahl des Behandlungsverfahrens sehr wichtig. Über die Toxizität der Metabolite, die dann nach der Ozonierung noch in der wässrigen Phase verbleiben, ist tatsächlich zu wenig bekannt.

Die Versuche im biologisch gereinigten Abwasser zeigen vergleichbare Ergebnisse zu den oben diskutierten Reinstwasserversuchen. Die Toxizitätstests zeigen ein negatives Ergebnis. Bei der gewählten Ausgangskonzentration von 1 µg/L für die drei Stoffe CAP, BIC und IRI kann mit den drei Testsystemen keine Ökotoxizität festgestellt werden, was sehr erfreulich ist.

3.2 In Arbeit befindliche, im Jahre 2024 abgeschlossene* und neu begonnene Forschungsprojekte

Die 2024 in den Forschungsschwerpunkten Wasserqualität, Wassertechnologie, Biologische Abwasserreinigung und Biologische Grenzflächen bearbeiteten Projekte sind in **Tabelle 3.1** aufgeführt.

Im Folgenden werden zwei Projekte ausführlicher vorgestellt.

Aufklärung von „Wetting“ bei der Membrandestillation mit Hilfe der optischen Kohärenztomographie

Nurul Himma

Förderung: Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (MWK) für Promotionsstipendien der Landesgraduatiertenförderung (LGF); Karlsruher Institut für Technologie

Die Membrandestillation (MD) gilt als ein attraktives Verfahren zur Entsalzung in der Wassertechnologie. Sie bietet gegenüber der herkömmlichen Destillation und der Umkehrosmose einige Vorteile. Durch den Einsatz einer hydrophoben mikroporösen Membran, die nur den Transport von Wasserdampf aus dem warmen Feedstrom in den kalten Kondensatstrom zulässt, kann ein hochreines Wasser gewonnen werden [1, 2]. Je nach den Eigenschaften des Feedstroms, insbesondere bei Verunreinigungen mit geringer Oberflächenspannung, kann Wasser aus dem Feedstrom jedoch in die Membranporen eindringen und die Konden-

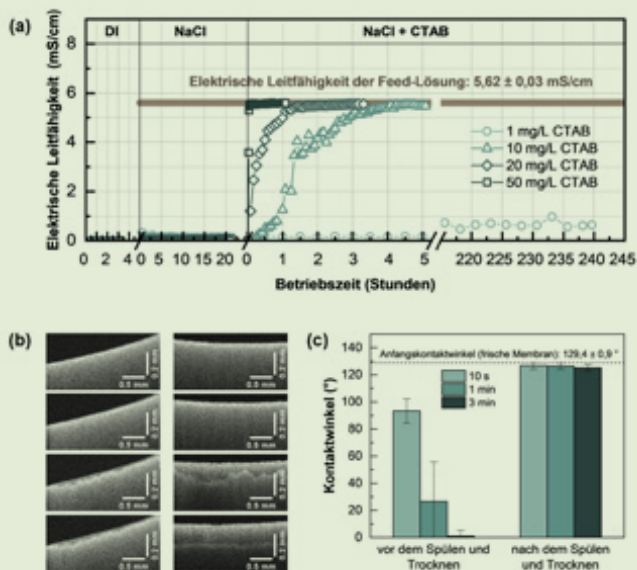


Bild 3.3: (a) Elektrische Leitfähigkeit des Kondensats, gemessen im MD-Experiment, beginnend mit deionisiertem Wasser (DI) für 3 h (Schritt A), 3 g/L NaCl für 21 h (Schritt B) und dann 3 g/L NaCl und CTAB (Schritt C) in verschiedenen Konzentrationen. (b) B-Scans, die die Entwicklung der Membranbenetzung während des Betriebs zeigen (von oben): Schritt A, Schritt B, Schritt C bei 1,5 h und 2 h für 20 mg/L CTAB, und 0,2 h und 0,5 h für 50 mg/L CTAB, entsprechend einem vergleichbaren kumulativen Kondensatvolumen von $45 \pm 16 \text{ L/m}^2$ bzw. $138 \pm 19 \text{ L/m}^2$ (linke Spalte: 20 mg/L CTAB; rechte Spalte: 50 mg/L CTAB). (c) Kontaktwinkel von DI auf der verwendeten Membranoberfläche (nach Schritt C mit 50 mg/L CTAB) vor und nach dem Spülen und Trocknen. CTAB: Cetyltrimethylammoniumbromid.

satqualität verschlechtern. Dieses Benetzungsphänomen (im Englischen „Wetting“) stellt eine wichtige Herausforderung bei der MD dar. Verschiedene Strategien zur Überwachung und Reduktion der Benetzung wurden in den letzten Jahren vorgeschlagen [3, 4].

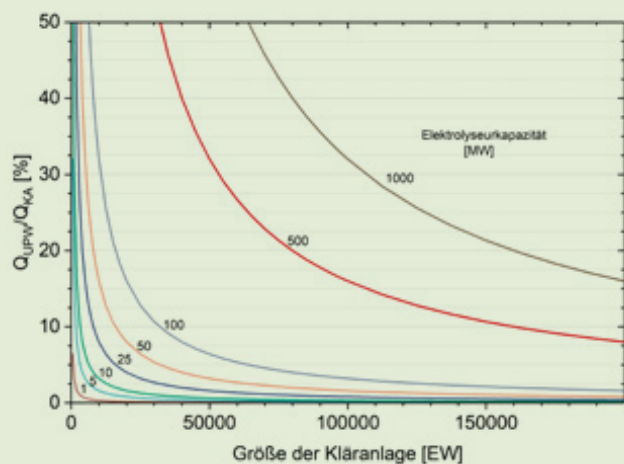


Bild 3.4: Diagramm zum Abschätzen des benötigten Kläranlagenablaufs zur Produktion von UPW je nach Elektrolyseurgröße

Am Engler-Bunte-Institut wurde in den letzten zwei Jahren die optische Kohärenztomographie (OCT) eingesetzt, um ein umfassendes Verständnis der Benetzungsentwicklung und -verteilung zu erhalten. Die Untersuchungen wurden kombiniert mit weiteren In-situ-Messungen (elektrische Leitfähigkeit und Permeatflux). Darüber hinaus wurden Messungen des Kontaktwinkels und des Flüssigkeitseintrittsdrucks an den Membranen durchgeführt, um eine Korrelation zwischen Trennleistung und Membranbenetzbarkeit abbilden zu können. Die MD-Experimente wurden in drei Schritten durchgeführt:

- Schritt A: deionisiertes Wasser für drei Stunden
- Schritt B: 3 g/L NaCl für 21 Stunden
- Schritt C: 3 g/L NaCl und der oberflächenaktive Stoff Cetyltrimethylammoniumbromid (CTAB) in unterschiedlichen Konzentrationen.

Der letzte Schritt wurde nach 240 Stunden beendet oder wenn die elektrische Leitfähigkeit des Kondensats den Wert des Feedstroms erreichte. Alle Versuche wurden bei konstanter Salzkonzentration im Zulauf durchgeführt, indem Konzentrat und Kondensat wieder zusammengeführt wurden. Darüber hinaus wurde untersucht, inwieweit durch Spülen und Trocknen der benetzten Membranen die Benetzung rückgängig zu machen ist. Während der Trocknung wurde ebenfalls die OCT eingesetzt, um den Prozess aufzuklären. Die Ergebnisse zeigen, dass die CTAB-Konzentration die Benetzungsrate und -verteilung stark beeinflusst. Wie in **Bild 3.3a** dargestellt, war die elektrische Leitfähigkeit des Kondensats bei Zugabe von 1 mg/L CTAB über zehn Betriebstage stabil. Bei 10 mg/L CTAB änderte sich das Verhalten merklich und es wurde ein Durchbruch beobachtet. Eine weitere Erhöhung der Konzentration auf 20 und 50 mg/L beschleunigte den Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit, was zu einer Änderung der Form der Durchbruchkurven führte. Die benetzten Teile der Membran wurden erfolgreich mittels OCT visualisiert (**Bild 3.3b**). Dabei zeigte sich, dass die Benetzung bei CTAB-Konzentrationen $\leq 20 \text{ mg/L}$ zufällig verteilt und bei einer Konzentration von 50 mg/L weitestgehend homogen war. In dem getesteten Konzentrationsbereich war die Benetzung in der Nähe des Feedstromeintritts der verwendeten Module ausgeprägter als in der Mitte und in der Nähe des Auslasses (bestätigt durch OCT-Datensätze und Ex-situ-Messungen – Daten werden hier nicht gezeigt), was auf die Druck- und Temperaturverteilung entlang der Membran zurückgeführt werden kann. Die Heterogenität der Benetzung auf der gesamten Membranfläche deutet darauf hin, dass der Ort der Beobachtung für eine frühzeitige Erkennung des „Wetting“ entscheidend ist. Es kann dann eine gute Korrelation mit der Trennleistung gezeigt werden. Die Benetzung war mit einer Abnahme der Hydrophobizität der Membran aufgrund der CTAB-Adsorption verbunden, und die Hydrophobizität der Membranoberfläche konnte wiederhergestellt werden, wie der Kontaktwinkel nach Spülung und

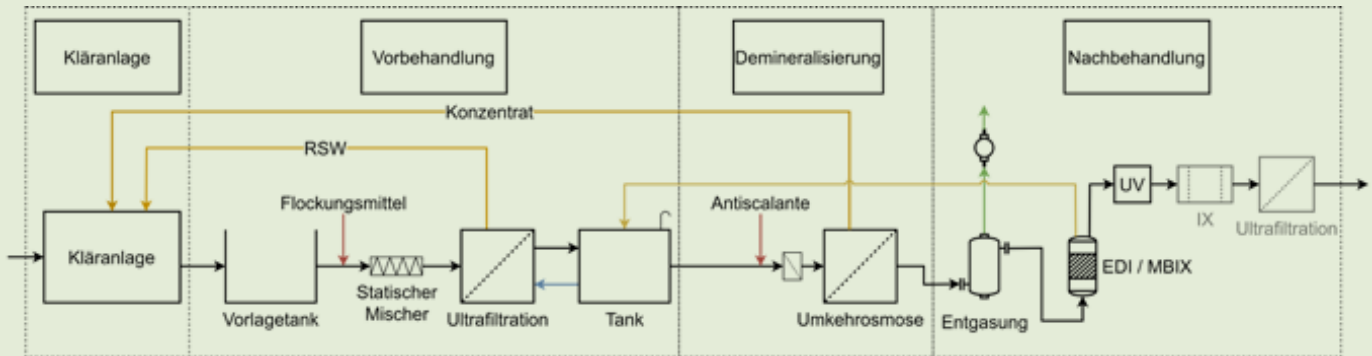


Bild 3.5: Diagramm zum Abschätzen des benötigten Kläranlagenablaufs zur Produktion von UPW je nach Elektrolyseurgröße

Trocknung zeigt (Bild 3.3c). Im anschließenden Betrieb (nach dem Spülen und Trocknen) wurde jedoch ein Trennungsversagen beobachtet, was auf eine unvollständige Wiederherstellung der Hydrophobizität der inneren Poren hinweist. Dies ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

- [1] Al-Obaidani, S.; Curcio, E.; Macedonio, F.; Di Profio, G.; Al-Hinai, H. und Drioli, E.: Potential of membrane distillation in seawater desalination: Thermal efficiency, sensitivity study and cost estimation. *Journal of Membrane Science*. 323(1) (2008) 85-98, DOI: 10.1016/j.memsci.2008.06.006.
- [2] El-Bourawi, M.S.; Ding, Z.; Ma, R. und Khayet, M.: A framework for better understanding membrane distillation separation process. *Journal of Membrane Science*. 285(1) (2006) 4-29, DOI: 10.1016/j.memsci.2006.08.002.
- [3] Jacob, P.; Dejean, B.; Laborie, S. und Cabassud, C.: An optical in-situ tool for visualizing and understanding wetting dynamics in membrane distillation. *Journal of Membrane Science*. 595 (2020) 117587, DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117587.
- [4] Horseman, T.; Yin, Y.; Christie, K.S.S.; Wang, Z.; Tong, T. und Lin, S.: Wetting, scaling, and fouling in membrane distillation: State-of-the-art insights on fundamental mechanisms and mitigation strategies. *ACS ES&T Engineering*. 1(1) (2021) 117-140, DOI: 10.1021/acses-teng.0c00025.

Nutzung von biologisch gereinigtem Abwasser für die Wasserstoffelektrolyse: Projekt KA4H2 und Studie H2ZVK

Jan Singer, Yair Morales

Förderung: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Für das Ziel, verschiedene Sektoren wie Industrie, Energieversorgung und Verkehr zu dekarbonisieren, entwickelt sich grüner Wasserstoff zu einem wichtigen Energieträger bei der Energiewende. Das steigende Interesse zeigt sich auch in der Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie, so soll in Deutschland bis 2030 eine Elektrolysekapazität von 10 GW aufgebaut werden [5]. Neben erneuerbarer Energie benötigen Elektrolyseure etwa 11 L Reinstwasser (UPW = ultrapure

water) allein für die Erzeugung von 1 kg Wasserstoff und eventuelle zusätzliche Wassermengen zur Kühlung [6].

Um die grüne Wasserstoffherzeugung unabhängig von lokalen Frischwasserressourcen zu gestalten, betrachtet das Projekt KA4H2 die Kopplung von Wasserelektrolyseuren und kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Nutzungspotenzial des gereinigten Abwassers für die UPW-Aufbereitung und Bereitstellung für Elektrolyseure.

Der UPW-Verbrauch eines Elektrolyseurs bei voller Kapazität lässt sich über die Formel (1) berechnen. P_{el} gibt dabei die elektrische Leistung und SE_{el} den spezifischen Energiebedarf zur Produktion von 1 kg Wasserstoff des Elektrolyse-Stacks an. SE_{el} variiert je nach Elektrolyseur und liegt im Bereich von 48 – 60 kWh/kg Wasserstoff, was einem Wirkungsgrad von 60 – 70 % entspricht. Der restliche Teil der elektrischen Energie wird in Wärme umgewandelt, welche aus dem Prozess abgeleitet werden muss. Formel (2) beschreibt die theoretische Menge an Kläranlagenablauf, welche täglich bei Trockenwetter anfällt. Der Einwohnerwert (EW-Wert) stellt eine Rechengröße für die Abwasserreinigung dar, wodurch Belastungen für Kläranlagen abgeschätzt werden können.

$$Q_{UPW} = \frac{11 \text{ L}_{UPW}/\text{kg}_{H_2}}{SE_{el}} * P_{el} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (1)$$

$$Q_{KA} = \text{EW-Wert} * \text{KA-Größe} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (2)$$

In Bild 3.4 ist das Verhältnis von UPW und Kläranlagenablauf Q_{UPW}/Q_{KA} über die Kläranlagengröße aufgetragen. Die einzelnen Kurven beschreiben dabei die Verläufe für unterschiedliche Elektrolyseurgrößen. Für die Berechnung wurde ein SE_{el} von 55 kWh/kg H_2 und ein Abwasseranfall von 150 $\text{L}_{Abwasser}/(\text{EW} * \text{d})$ gewählt. Über das Diagramm kann eine erste Abschätzung zur Auswahl einer passenden Elektrolyseurgröße vorgenommen werden. So benötigt beispielsweise ein 100 MW-Elektrolyseur bei Volllast ca. 6 % des Kläranlagenablaufs einer 50.000 EW-Kläranlage.

Um die hohen Reinheitsanforderungen der Elektrolyseurhersteller von $< 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ für alkalische Elektrolyseure und $< 0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$

cm für PEM-Elektrolyseure zu erfüllen, werden verschiedene Prozesse benötigt. Diese werden in eine Vorbehandlung, Demineralisierung und Nachbehandlung unterteilt. Speziell die Vorbehandlung spielt bei der Aufbereitung von gereinigtem Abwasser eine wichtige Rolle, da dieses im Vergleich zu Brunnen- oder Trinkwasser erhöhte Mengen an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC), Stickstoff- und Phosphatverbindungen sowie Fest- und Spurenstoffen aufweist. Sie dient dem Schutz und der Entlastung der Demineralisierung und zielt hauptsächlich auf die Entfernung von Partikeln, Bakterien und organischen Stoffen ab. Häufig kommt in der Wasserrückverwendung hierfür eine Koagulation und Flockung mit anschließender Ultrafiltration zum Einsatz.

Die Entsalzung spielt die zentrale Rolle bei der Entfernung gelöster Stoffe, insbesondere ein- und mehrwertiger Ionen. Die Membrantechnologie Umkehrosmose kommt hierfür am häufigsten zum Einsatz, allerdings können auch thermische Prozesse wie die Multi-Effekt-Destillation oder die Membrandestillation eingesetzt werden. Diese arbeiten im Temperaturbereich von 45-60 °C und könnten die bei der Elektrolyse anfallende Abwärme zur Wasseraufbereitung nutzen.

Da die Reinheit nach der Entsalzung meist noch nicht ausreicht, steht als letzter Schritt eine Nachbehandlung mit verschiedenen Technologien an.

In der Machbarkeitsstudie H2ZVK zur Erzeugung von grünem Wasserstoff auf dem Klärwerk Ulm Steinhäule (ZVK) wurde ein Konzept zur Aufbereitung von Kläranlagenablauf für drei verschiedene Elektrolyseurgrößen (5, 10 und 20 MW) ausgearbeitet (siehe Bild 3.5). Der benötigte Anteil am Kläranlagenablauf in Steinhäule liegt auch bei 20 MW unter 0,5 % des Gesamtablaufs. Der Energieverbrauch dieses Gesamtprozesses beträgt ca. 1,5 kWh/m³ erzeugtem Reinstwasser, wobei die Demineralisierung mit 1 kWh/m³ den größten Bedarf ausmacht [7]. Bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch des 20-MW-Elektrolyseurs entspricht dies weniger als 1 % [8].

Erste Erkenntnisse aus diesem Projekt zeigen die potenziellen Synergien, welche Kläranlagen als Elektrolyse-Standorte bieten, unter anderem die Nutzung von gereinigtem kommunalem Abwasser als Alternative zu Frischwasser. Die Technologien zur UPW-Produktion aus Kläranlagenablauf sind bereits am Markt verfügbar und je nach Kläranlage und Elektrolysegröße stehen ausreichende (Ab)Wassermengen zur Verfügung. Einen wichtigen nächsten Schritt stellt daher der Test in der Praxis dar.

- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023. Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023.
- [6] Saravia, F.; Gehrman S.; Schwarz, S. und Koch, M: Factsheet: Gesamtwasserbedarf der Elektrolyse (DVGW e.V.), 2024.
- [7] Morales, Y.; Singer, J.; Fuchs, J.; Schäfer, E.; Weiß, F.; Kley, C.; Horn, H. und Saravia, F.: Integrale H₂-Machbarkeitsstudie am Standort Klärwerk Steinhäule. (2024) <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10725>, abgerufen am: 11.03.2025
- [8] Morales, Y.; Samanta, P.; Tantish, F.; Horn, H. und Saravia, F.: Water management for Power-to-X offshore platforms: an underestimated item. *Sci Rep* 13 (2023) 12286, DOI: 10.1038/s41598-023-38933-w

3.3. Veröffentlichungen

Veröffentlichungen in peer-reviewed Fachjournalen und Buchbeiträge:

- [9] Wang, Y.; Chen, F.; Guo, H.; Sun, P.; Zhu, T.; Horn, H. und Liu, Y.: Permanganate (PM) pretreatment improves medium-chain fatty acids production from sewage sludge: The role of PM oxidation and in-situ formed manganese dioxide. *Water Research* 249 (2024) 120869, DOI: 10.1016/j.watres.2023.120869.
- [10] Huisman, K.T.; Blankert, B.; Horn, H.; Wagner, M.; Vrouwenfelder, J.S.; Bucs, S. und Fortunato, L.: Noninvasive monitoring of fouling in membrane processes by optical coherence tomography: A review. *Journal of Membrane Science* 692 (2024) 122291, DOI: 10.1016/j.memsci.2023.122291.
- [11] Du, R.; Liu, Q.; Xu, X.; Horn, H.; Cao, S. und Peng, Y.: Enhancing Competitiveness of Anammox Bacteria with Domestic Wastewater as Electron Donor for Nitrate-Preferential Denitrification: Experimental Evidence and Metagenomic Mechanism. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 12 (2024), 1007-1018, DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c06523.
- [12] Aliaskari, M.; Wezstein, J.; Saravia, F. und Horn, H.: A systematic analysis of operating parameters for CO₂ capture from seawater by Bipolar Membrane Electrodialysis (BMED). *Separation and Purification Technology* 339 (2024) 126679, DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126679.
- [13] Shylaja Prakash, N.; Maurer, P.; Horn, H. und Hille-Reichel, A.: Valorization of organic carbon in primary sludge via semi-continuous dark fermentation: First step to establish a wastewater biorefinery. *Bioresource Technology* 397 (2024) 130467, DOI: 10.1016/j.biortech.2024.130467.
- [14] Stelmaszyk, L.; Stange, C.; Hügler, M.; Sidhu, J.P.S.; Horn, H. und Tiehm, A.: Quantification of β -lactamase producing bacteria in German surface waters with subsequent MALDI-TOF MS-based identification and β -lactamase activity assay. *Heliyon* 10(5) (2024), e27384.
- [15] Xiao, K.; Abbt-Braun, G.; Pleitner, R. und Horn, H.: Effect of ciprofloxacin on the one-stage partial nitrification and anammox biofilm system: A multivariate analysis focusing on size-fractionated organic components. *Chemosphere* (2024) 141731, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141731.
- [16] Zimmermann, S.; Revel, M.; Borowska, E. und Horn, H.: Degradation and mineralization of anti-cancer drugs Capecitabine, Bicalutamide and Irinotecan by UV-irradiation and ozone. *Chemosphere* (2024) 141780, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141780.
- [17] Bunani, S.; Abbt-Braun, G. und Horn, H.: Heavy Metal Removal from Aqueous Solutions Using a Customized Bipolar Membrane Electrodialysis Process. *Molecules* 29 (2024) 1754, DOI: 10.3390/molecules29081754.
- [18] Telgmann, L. und Horn, H.: The behavior of pharmaceutically active compounds and contrast agents during wastewater treatment – Combining sampling strategies and analytical techniques: A critical review. *Science of The Total Environment* 946 (2024) 174344, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174344.
- [19] Du, R.; Chang, F.; Fan, J.; Xu, D.; Cao, S.; Peng, Y. und Horn, H.: Biofilms recall versatile capability of anammox integrating with heterotrophs and advances in application for wastewater treatment: A critical review. *Chemical Engineering Journal* 496 (2024) 154198, DOI: 10.1016/j.cej.2024.154198.
- [20] Lesmeister, L.; Hale, S.E.; Merklinger, M.; Horn, H. und Riegel, M.: The effect of inorganic anions on the adsorption of perfluoroalkyl acids to various polymeric anion exchange resins. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12(6) (2024) 114871, DOI: 10.1016/j.jece.2024.114871.

- [21] Tosun, J.; Debus, M.; Schaub, S.; Klein, S.; Scherer, U.; Goeschl, T. und Horn, H.: Tap water consumption choices in out-of-home settings: insights from a survey of German adults. *International Journal of Water Resources Development* (2024) 1-20, DOI: 10.1080/07900627.2024.2423742.
- [22] Cong, X.; Mazierski, P.; Miodyńska, M.; Zaleska-Medynska, A.; Horn, H.; Schwartz, T. und Gmurek, M.: The role of TiO₂ and gC₃N₄ bimetallic catalysts in boosting antibiotic resistance gene removal through photocatalyst assisted peroxone process. *Scientific Reports* 14(1) (2024) 22897, DOI: 10.1038/s41598-024-74147-4.
- [23] Bucs, S.; Jung, O.; Wagner, M.; Saravia, F.; Horn, H. und 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* 713 (2025) 123219, DOI: 10.1016/j.memsci.2024.123219.
- [24] Beratto-Ramos, A.; Jaramillo, K.; Zapata, P.; Romero, J.; Martínez, J.; Meléndrez, M.F.; Saravia, F.; Horn, H.; Borquez, R. und Pino-Soto, L.: Characterization and evaluation of the recovery process of saturated reverse osmosis membranes by chemical oxidation. *Desalination* (2025) 118273, DOI: 10.1016/j.desal.2024.118273.

Veröffentlichungen in nicht peer-reviewed Fachjournalen:

- [25] Singer, J.; Yair Morales, Y.; Saravia, F.; Horn, H.; Morck, T.; Otter, P. und Schmidtke, J.: Nutzung von biologisch gereinigtem Abwasser für die Wasserstoffproduktion. *energie | wasser-praxis* (6 + 7) (2024) 2 - 7.

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

- [26] Volume 91: Stephan Zimmermann (2024) Oxidative Transformation von Krebsmedikamenten in der wässrigen Phase. ISSN 2747-819X



Autoren:

Prof. Dr. rer. nat. Harald Horn

Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
Karlsruhe
Tel.: 0721 608-42580
harald.horn@kit.edu
<https://wasserchemie.ebi.kit.edu>



Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb

Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
Karlsruhe
Tel.: 0721 608-42560
thomas.kolb@kit.edu
<https://ceb.ebi.kit.edu/>



Prof. Dr. Reinhard Rauch

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



Prof. Dr.-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/>



Prof. Dr. Oliver Thomas Stein

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



Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis

Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
Karlsruhe
Tel.: 0721 608-42570
dimosthenis.trimis@kit.edu
<https://vbt.ebi.kit.edu/>



TT-Prof. Dr. Moritz Wolf

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

