

aus gwf Gas + Energie 06/2021 + 07-08/2021 und  
gwf-Wasser|Abwasser 06/2021 + 07-08/2021

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

## Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser im Jahr 2020

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

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



Nino Maaskola: "40-Tonnen Eisen zerrissen", Skulptur vor den Gebäuden 40.50 und 40.51 (Quelle: KIT/ Kira Heid).

# Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und TZW: DVGW-Technolo- giezentrum Wasser im Jahr 2020

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Forschungs-  
stelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologie-  
zentrum Wasser, Karlsruhe

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

Forschung und Lehre, Tätigkeitsbericht, Ausbildung, Weiterbildung

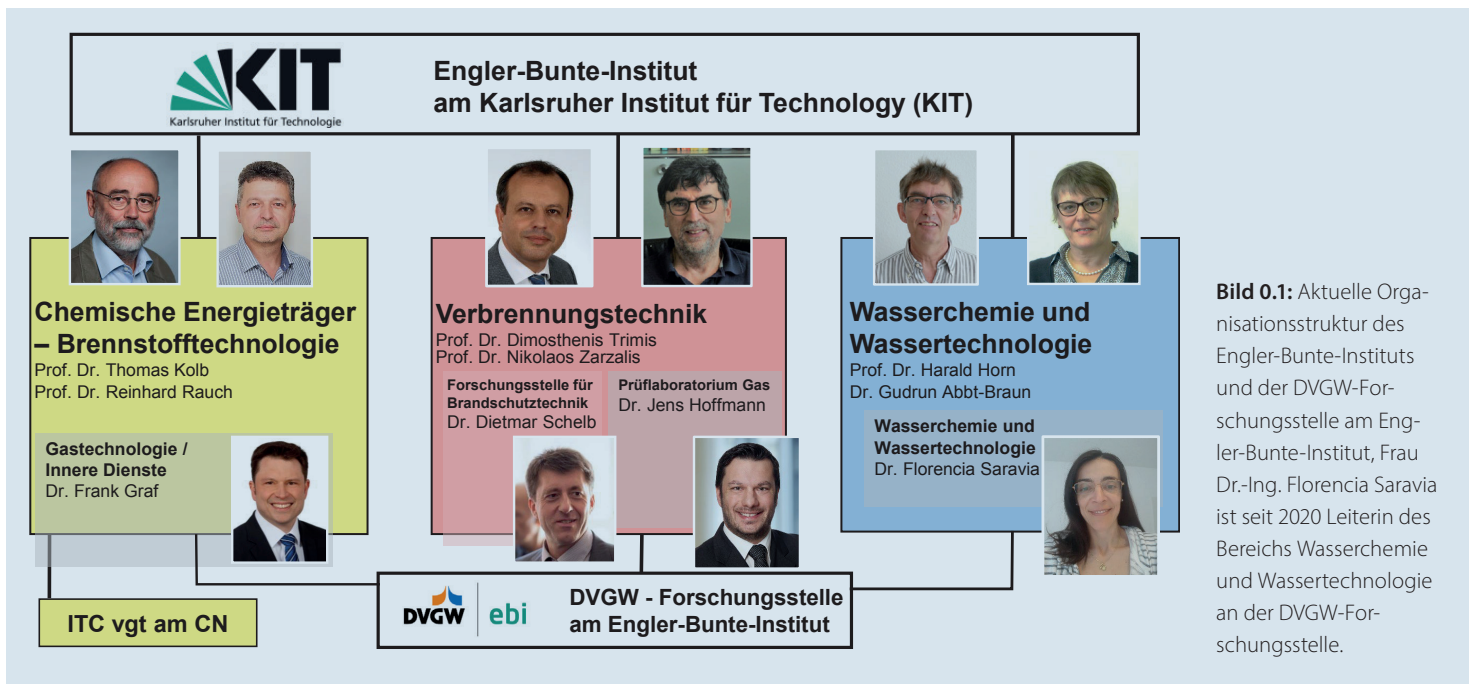
Dieser jährlich erscheinende Bericht gibt einen Überblick über die Entwicklungen und Aktivitäten am Engler-Bunte-Institut, der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT sowie der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Darüber hinaus wird über das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser berichtet.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

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

## Zur Geschichte und zum Umfeld

Das Engler-Bunte-Institut am Karlsruher Institut für Technologie ist hervorgegangen aus der 1907 gegründeten „Lehr- und Versuchsgasanstalt“ und führt seit 1971 den Namen „Engler-Bunte-Institut“. Die enge Verbindung zu praxisrelevanten Fragestellungen des Gas- und Wasserfa-

ches äußert sich darin, dass die jeweiligen Teilinstitutsleiter, gegenwärtig „Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie“, „Verbrennungstechnik“ und „Wasserchemie und Wassertechnologie“, auch in Personalunion Leiter der entsprechenden Bereiche der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT sind.



**Bild 0.1:** Aktuelle Organisationsstruktur des Engler-Bunte-Instituts und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Frau Dr.-Ing. Florencia Saravia ist seit 2020 Leiterin des Bereichs Wasserchemie und Wassertechnologie an der DVGW-Forschungsstelle.

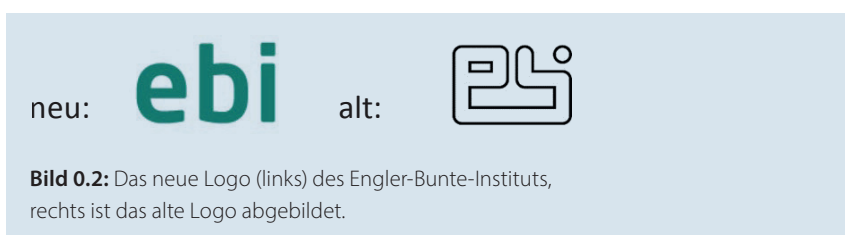
Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist nach dem Zusammenschluss des Forschungszentrums Karlsruhe und der Universität Karlsruhe im Jahre 2009 inzwischen eine feste Größe in der internationalen Forschungslandschaft. Dies gelingt mit dem hohen Anspruch, sich selbst als die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft zu definieren. Im KIT wird seit dem Jahre 2015 ein übergeordneter Strategieprozess (Dachstrategie KIT 2025) umgesetzt, der als Konsequenz des zuvor erarbeiteten Leitbilds des KIT angesehen werden kann. Das KIT hat sich 2015 zum Ziel gesetzt, maßgeblich Beiträge zu den Feldern Energie, Mobilität und Information zu leisten. 2019 konnte das KIT im Rahmen der Exzellenzstrategie von Bund und Ländern mit dem Leitmotiv „Living the Change“ in den Kreis der Exzellenzuniversitäten in Deutschland zurückkehren.

Unstrittig ist das Engler-Bunte-Institut (EBI) ein wichtiger Baustein der Strategie, indem es das KIT-Leitbild mit relevanten Forschungsfragen/-projekten und der Ausbildung des ingenieur- und naturwissenschaftlichen Nachwuchses bespielt. So sieht das KIT sich „in der Verantwortung, durch Forschung und Lehre Beiträge zur nachhaltigen Lösung großer Aufgaben von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu leisten“. „Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften sowie Geistes- und Sozialwissenschaften bilden den Fächerkanon des KIT. Mit hoher interdisziplinärer Wechselwirkung erschließen sie Themenstellungen von den Grundlagen bis zur Anwendung, von der Entwicklung neuer Technologien bis zur Reflexion des Verhältnisses von Mensch und Technik. Um dies bestmöglich zu erreichen, erstreckt sich die Forschung am KIT

über die gesamte Bandbreite: von der Grundlagenforschung bis zu industrienaher, angewandter Forschung, von kleinen Forschungsvorhaben bis zu langfristigen Großforschungsprojekten.“

Das Engler-Bunte-Institut am KIT zusammen mit der angeschlossenen DVGW-Forschungsstelle trägt seit Jahren mit einer sehr hohen internationalen Sichtbarkeit im Rahmen von Forschungs- und Lehrtätigkeit zu den Themenfeldern Energie und Umwelt wesentlich zur Umsetzung des KIT-Leitbilds bei. Diese Zusammenarbeit wurde vom Landesrechnungshof 2020 nach einer Prüfung des Engler-Bunte-Instituts in 2019 positiv adressiert. Die Organisation des Engler-Bunte-Instituts ist in **Bild 0.1** dargestellt. Seit 2020 ist Frau Dr.-Ing. Florencia Saravia die Leiterin des Bereichs Wasserchemie und Wassertechnologie an der DVGW-Forschungsstelle des Engler-Bunte-Instituts.

Am Tag der Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts (als online-Veranstaltung am 10. Juni 2020) wurde auf der Kuratoriumssitzung des Engler-Bunte-Instituts und in der Mitgliederversammlung einem neuen Logo für das Engler-Bunte-Institut zugestimmt (**Bild 0.2**)





**Bild 0.3:** Kunstobjekt vor dem neuen Gebäude des Engler-Bunte-Instituts.

Darüber hinaus ging 2020 der seit 2019 von der Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts vergebene Preis für die beste Masterarbeit an Herrn Fabian Hardock, der bei seiner Arbeit zu Rußpartikeln (*Entwicklung und Validierung eines HRTEM-Bildauswertungsalgorithmus zur nanostrukturellen Analyse von Rußpartikeln*) von Prof. Henning Bockhorn betreut wurde.

Nach dem Bezug der neuen Gebäude (40.50 und 40.51) des Engler-Bunte-Instituts wurde im letzten Jahr auch die Kunst am Bau abgeschlossen. Es handelt sich bei dem Objekt um einen länglichen Quader aus Eisen (Grauguss), der in zwei Teile gesprengt wurde, die nun vor dem Gebäude 40.51 installiert sind (**Bild 0.3**). Ein Video der Herstellung des Quaders und der anschließenden Sprengung kann im Internetauftritt des Künstlers Nino Maaskola gefunden werden (<http://nino-maaskola.de/40-tonnen/>).

### Forschung und Beratung am Engler-Bunte-Institut und am TZW

Das Aufkommen von Forschungsprojekten aus dem Gas- und Verbrennungsfach sowie dem Wasserfach ist nach

wie vor sehr hoch. Die Mittel kommen dabei vom Land BW (Ministerien, BW-Stiftung), dem Bund (DFG, BMBF, BMWi, DBU, HGF) und der Europäischen Union. Die einzelnen Forschungsprojekte werden in den Berichten der Teilinstitute detaillierter dargestellt. Die aus der Praxis entstehenden Fragestellungen werden vor allem in der DVGW-Forschungsstelle, der Abteilung Gastechologie, dem Prüflaboratorium Gas und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bearbeitet.

Das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser entwickelt auf der Basis seiner umfangreichen Forschungsaktivitäten und Praxiserfahrungen Lösungen für alle Bereiche der nationalen und internationalen Wasserbranche vom Ressourcenschutz über die Gewinnung und Aufbereitung bis hin zur Entnahmemarmatur. Rund 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter stehen Wasserversorgern, Unternehmen, Fachbehörden und Hochschulen partnerschaftlich zur Seite. Das TZW liefert zuverlässige Zahlen, Daten und Fakten und entwickelt daraus innovative Konzepte für eine zukunftsfähige Wasserversorgung. Organisatorisch ist das TZW untergliedert in die Fachabteilungen: Wasserversorgung, Wasserchemie, Wasserbiologie, Wasserverteilung und Prüfstelle Wasser.

Erfreulich war im Jahr 2020, dass nahezu alle Forschungsarbeiten am EBI und am TZW trotz der Corona-Pandemie weiterlaufen konnten. Dies wurde ermöglicht durch die Erstellung von spezifischen Gefährdungsbeurteilungen und den entsprechenden Betriebsanweisungen (ab März 2020) für das Arbeiten in den Werkstätten und Laboratorien auf der einen Seite und die intensive Nutzung der Möglichkeit zum mobilen Arbeiten.

Zusätzlich zu den oben benannten Quellen der Förderung durch die öffentliche Hand wird ein erheblicher Anteil der Forschungsprojekte auch durch Aufträge aus Industrie und Unternehmen finanziert. Ein Partner für besonders innovative Forschungsideen ist die Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts, die die Teilinstitute seit Jahren zuverlässig und zum Teil sehr großzügig unterstützt. Die Ergebnisse der zahlreichen Forschungsprojekte sind in einer beachtlichen Zahl von Publikationen dokumentiert, die in führenden internationalen Fachjournalen mit strengen Begutachtungsverfahren erschienen sind. Die Verzeichnisse sind den Berichten der einzelnen Teilinstitute zu entnehmen.

### Lehre und Ausbildung

Im Grunde genommen stand die Lehre am Engler-Bunte-Institut das ganze Jahr 2020 unter dem Eindruck der Corona-Pandemie. Während die Lehre des WS 19/20 noch bis Anfang März in Präsenz angeboten wurde, waren dann Vorlesungen und Seminare ab SS 2020 als online Veranstaltungen für die Studierenden verfügbar. Einschränkungen

gen gab es bei den großen Praktika, bei denen die Studierenden die Versuche als Video angeboten bekommen haben und dann auf der Basis von „Versuchsergebnissen“ ihre Protokolle schreiben mussten. Nur ein Teil der Praktika konnte im Sommer 2020 in Präsenz durchgeführt werden. Erfreulich war, dass wir die Durchführung von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten nahezu uneingeschränkt realisieren konnten, da der Zugang zu den Laboratorien nicht eingeschränkt war, solange die Abstandsregeln und die weiteren Schutzmaßnahmen (wie das Tragen von Masken) eingehalten wurden.

Nach wie vor ist der Zugang von Studierenden in den ersten Semestern der Ingenieurstudiengänge an deutschen Universitäten nicht zufriedenstellend. Auch der Bachelor-Studiengang „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ ist betroffen, konnte aber die Zahlen im WS 20/21 stabil halten. Der Bachelor-Studiengang „Bioingenieurwesen“ ist ausgelastet und stellt zurzeit ein Drittel der Studierenden im ersten Semester. Im Rahmen der Studiengänge „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ und „Bioingenieurwesen“ beteiligt sich das Engler-Bunte-Institut an der Grundausbildung und bietet in

den Bereichen Brennstoffe, Energieverfahrenstechnik, Verbrennung und Wasserchemie/Wassertechnologie eine Reihe von Hauptfächern, Vertiefungsrichtungen und Profulfächern an. Für den englischsprachigen Studiengang „Water Science and Engineering“ wird vom Engler-Bunte-Institut das Profil „Water Technologies & Urban Water Cycle“ bedient, mit Veranstaltungen zur Wasserqualität, Mess-/Analysetechnik und Wasserbehandlung.

Neben der Studierenden- und Doktorandenausbildung ist die Weiterbildung der bereits im Beruf stehenden Fachleute ein zentraler Bestandteil des Programms am Engler-Bunte-Institut. Leider musste für 2020 der Gaskursus am Engler-Bunte-Institut wegen der Pandemie abgesagt werden. Eine lange geplante internationale Konferenz „Biofilms9“ wurde mit 280 Teilnehmern online durchgeführt.

Der folgende detailliertere Tätigkeitsbericht enthält wie in den letzten Jahren Beiträge der drei Bereiche am Engler-Bunte-Institut und der angeschlossenen DVGW-Forschungsstelle und des TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser.

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

**Thomas Kolb, Reinhard Rauch, Siegfried Bajohr, Frank Graf**

### **1.1 Lehre und Forschung**

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

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

Die grundlagenorientierten F&E-Arbeiten von EBI ceb werden ergänzt durch die Arbeiten zur Flugstrom-Vergasung 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 verstärkt genutzt.

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

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

Das EBI ceb trägt darüber hinaus wesentlich zu den Grundlagenfächern der Studiengänge der Fakultät bei. Die Vorlesung „Prozess- und Anlagentechnik“, die als einzige Vorlesung verpflichtend für alle Studierenden der Masterstudiengänge ciw/vt/biw ist, vertieft die ingenieurs-

technischen 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 Profulfach „Energie- und Umwelttechnik“ für den Bachelor-Studiengang.

Es werden aber nicht nur die rein ingenieurwissenschaftlichen Fächer gelehrt, sondern auch überfachliche Qualifikationen, wie z. B. „Ethik und Stoffkreisläufe“, wo grundlegende Kenntnisse der Ethik und wichtige Stoffkreisläufe auf der Erde und ihre Beeinflussung durch menschliche Gesellschaften den Studierenden im Bachelorstudium vermittelt werden.

EBI ceb ist in verschiedenen englischsprachigen Studiengängen des KIT durch Vorlesungen und Praktika sowie in koordinierender Funktion tätig. Hier sind zu nennen: der Master-Studiengang ENTECH von EIT InnoEnergy, der Energie-Master-Studiengang im Bereich der KIT School of Energy sowie die Weiterbildung von Ingenieuren mit Industrieerfahrung im Rahmen der HECTOR School.

Alle Vorlesungen wurden ab dem Sommersemester 2020 über elektronische Medien gehalten. Die Umstellung war mit großem Aufwand auf Seiten der EDV-Fachleute, der betreuenden Doktoranden und der Lehrenden verbunden. Die Rückmeldung der Studierenden war durchweg sehr positiv. Studierende und Lehrende vermissen aber die Präsenz-Vorlesung und -Übung, die den direkten Austausch und die Diskussion wesentlich einfacher und intensiver ermöglicht.

Bei dem alle zwei Jahre verliehenen „Innovationspreis der Deutschen Gaswirtschaft“ erreichte die Dreiphasen-Methanisierung des EBI ceb in der Kategorie Forschung & Entwicklung im Jahr 2020 das Finale der drei innovativsten Projekte (<https://innovationspreis.gas.info/house-of-innovation/forschung-entwicklung/dreiphasen-methanisierung>). Weitere Ereignisse in 2020 aus dem Themenfeld Lehre und Fortbildung sind in **Tabelle 1.1** aufgeführt. Leider mussten hier einige Veranstaltungen auf Grund der angespannten Pandemie-Situation ausfallen.

### 1.2 Große Projekte zur Energiewende

Auch im Jahr 2020 wurden am EBI ceb und im Bereich Gastechologie der DVGW-Forschungsstelle wichtige Forschungsprojekte aus dem Umfeld der Energiewende und der Gaswirtschaft begonnen bzw. fortgesetzt. Besonders hervorzuheben sind dabei die im Folgenden aufgeführten Projekte:

1. **BMWi-Leitprojekt „MethQuest“:** Im Sommer 2018 wurde das Leitprojekt gestartet. Dieses besteht aus sechs Verbundprojekten mit einem Gesamtbudget von 32 Mio. € und beschäftigt sich mit der Erzeugung von EE-Methan über PtG-Verfahren und mit der Nutzung in stationären und mobilen Anwendungen. 2020 wurden u.a. erfolgreich Versuche an der 3-Phasen-Methanisierungsanlage am Energy-Lab 2.0 durchgeführt.
2. **Horizon 2020 Projekt „STORE&GO“:** Nach Auswertung der Betriebsphasen der drei PtG-Demonstrationsanlagen an den Standorten Falkenhagen (D), Troia (I) und Solothurn (CH) und Finalisierung der begleitenden Forschungsaktivitäten wurde das Projekt 2020 erfolgreich abgeschlossen.
3. **ENSURE II (BMBF):** Das Kopernikus-Projekt „ENSURE“ zu neuen Netzstrukturen wird fortgeführt. DVGW gt ist für die Sektorenkopplung mit Gas zuständig.
4. **Roadmap Gas 2050 (DVGW):** Im Rahmen des Verbundprojektes werden die Rolle von Gas bei der Energiewende mit Hilfe von technologischen und systemischen Untersuchungen analysiert und Lösungswege aufgezeigt. 2020 wurde u.a. analysiert wie EE-Gase in der MENA-Region erzeugt und nach Deutschland transportiert werden können.
5. **reFuels – Kraftstoffe neu denken:** Im Demonstrationsprojekt „reFuels“ geht es um die Herstellung und An-

**Tabelle 1.1:** Ereignisse 2020

Datum	Ereignis
20.01.2020	Exkursion im Rahmen der Vorlesung „Technical Systems for Thermal Waste Treatment“ zur BASF – N800 und den Technischen Werken Ludwigshafen TWL/GML.
17./18.02.2020	STORE&GO Abschlusskonferenz in Karlsruhe.
20.04.2020	Beginn der Vorlesungszeit im Sommersemester in digitaler Form.
23.03.2020	Der alljährliche Gaskursus muss abgesagt werden.
März 2020	Das alljährliche, mehrtägige Doktorandenseminar (Wanderseminar) wird vorerst verschoben. Da sich auch im Herbst die Situation nicht entspannt hat, wird es endgültig abgesagt.
23.09.2020	Der Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfachs in Kassel wird auf 2021 verschoben.
02.11.2020	Beginn der Vorlesungszeit im Wintersemester in digitaler Form.
22.12.2020	Auch die Weihnachtsfeier des EBI ceb kann nicht stattfinden.

wendung von regenerativen Kraftstoffen, wobei der Fokus auf Benzin aus Biomasse und Diesel aus CO<sub>2</sub> liegt.

### 1.3 Im Jahr 2020 abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten

Die folgenden Studierenden unserer Fakultät konnten im Jahr 2020 ihr Studium am EBI ceb mit dem Master abschließen:

- Daniel Böhm „Bestimmung der Vergasungskinetik biogener Festbrennstoffe mit H<sub>2</sub>O im Einzelpartikelreaktor bei erhöhtem Druck“, Prof. Kolb
- Daniel Conrad „Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von biogenem Pyrolyseöl in inerter Atmosphäre“, Prof. Kolb
- Deborah Fröhlich „Einsatz einer optischen Nadelsonde zur räumlich aufgelösten Messung der lokalen Hydrodynamik in Blasensäulen“, Prof. Kolb
- Yannick Gahler „Experimente und Modellierung zur Kinetik der Dreiphasen-Methanolsynthese“, Prof. Kolb
- Kevin Loran „Untersuchungen zur ortsaufgelösten Messung der Brennstoffverteilung im Flugstromvergaser über Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)“, Prof. Kolb
- Moritz Poßmann „Untersuchungen zur Sekundärpyrolyse von biogenem Pyrolyseöl in einem Hochtemperatur-Fallreaktor“, Prof. Kolb
- Felix Rinkewitz „Räumlich aufgelöste Messung der Hydrodynamik in Blasensäulen mittels optischer Nadelsonde“, Prof. Kolb
- Igor Scherbej „Untersuchung des dynamischen Betriebsverhaltens eines katalytischen Reaktors zur Dreiphasen-Methanisierung“, Prof. Kolb
- Josua Bauer „Ausarbeitung und Validierung einer katalytischen Route für das Upgrading einer biogenen Schwerbenzinfraction“, Prof. Rauch
- Xhesika Korovesi „Integration of Refineries into the Energy Transformation Process: Production of Gasoline-Components from Synthesis Gas and its Integration in Existing Refinery-Processes on the Example of MiRO“, Prof. Rauch

Die folgenden Studierenden haben am EBI ceb ihre Bachelorarbeit abgeschlossen:

- Marius Birg „Inbetriebnahme einer Laboranlage zur Untersuchung der Hydrodynamik in Packungskolonnen“, Prof. Kolb
- Max Christeinicke „Messung von Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten zur atmosphärischen Charakterisierung von Brennerdüsen für Flugstromvergaser“, Prof. Kolb
- Martin Daescu „Experimentelle Untersuchungen zur Hydrodynamik von viskosen Flüssigkeiten in Packungskolonnen“, Prof. Kolb

- Fabian Eckert „Auslegung und Aufbau einer Kolonne zur Vorsättigung von Gasströmen in Packungskolonnen“, Prof. Kolb
- Jannis Götz „Experimentelle Untersuchung einer 3-flutigen Zerstäuberdüse“, Prof. Kolb
- Tim Kurtz „Experimentelle Untersuchungen an einer Laboranlage zum Stofftransport von CO<sub>2</sub> in Wasser in Packungskolonnen“, Prof. Kolb
- Marius Müller „Untersuchung zur Massenstromskalierung gasgestützter Düsen“, Prof. Kolb
- Wiebke Asbahr „Experimentelle Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Katalysatoren hinsichtlich Aktivität und Produkteigenschaften bei Hydroprocessing von Fischer-Tropsch-Wachsen“, Prof. Rauch
- Denis Wiegand „Wirtschaftlichkeitsanalyse einer Wirbelschichtvergasungsanlage betrieben mit Biomasse“, Prof. Rauch
- Henning Rädle „Methodische Untersuchung Petrochemisch relevanter Parameter von Bioliq® Kraftstoffen mittels FT-IR-Spektroskopie“, Prof. Rauch

### 1.4 Laufende wissenschaftliche Arbeiten

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

Thomas Kolb, Fabian Hüsing,  
Christoph Schneider, Stella Walker,  
Sonia Rincón Prat (Gastwissenschaftlerin)

Im Rahmen der Helmholtz-Programme „Energy Efficiency, Materials and Resources“, EMR und „Erneuerbare Energien“, EE sowie des „Helmholtz Virtual Institute for Gasification Technology“, HVIGasTech werden Forschungsarbeiten zur Flugstromvergasung von biogenen Suspensionsbrennstoffen durchgeführt. Während die anwendungsnahen Forschungsthemen in der Abteilung Vergasungstechnologie des Instituts für Technische Chemie, ITC vgt am Campus Nord (CN) des KIT bearbeitet werden, liegt der Schwerpunkt der Forschung am EBI ceb auf den Grundlagen der Vergasung von Festbrennstoffen sowie der Umsetzung von Pyrolyseöl.

#### **Kinetik der Feststoffvergasung**

Beim Flugstromvergasungsprozess mit einem Suspensionsbrennstoff als Einsatzstoff wird der Brennstoff zunächst zerstäubt und verdampft. Anschließend durchläuft der trockene Koks eine Sekundärpyrolyse unter hohen Temperaturen und Aufheizraten. Der vorliegende Sekundärkoks reagiert nun heterogen mit CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Diese Reaktionen sind der geschwindigkeitsbestimmende Schritt des Vergasungsprozesses. Für die Ermittlung dieser Vergasungskinetik muss zunächst ein Pyrolysekoks unter prozessnahen Bedingungen, d. h. hohen Temperaturen und Aufheizraten, erzeugt werden. Die Herstellung

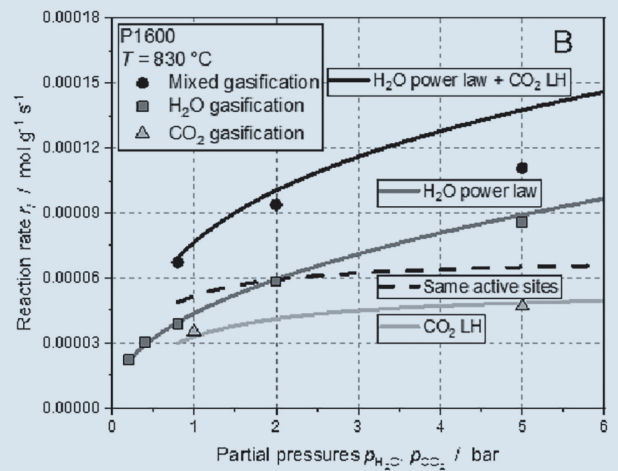
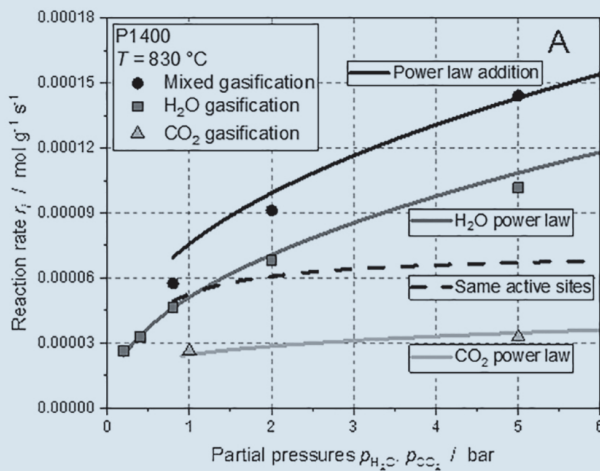
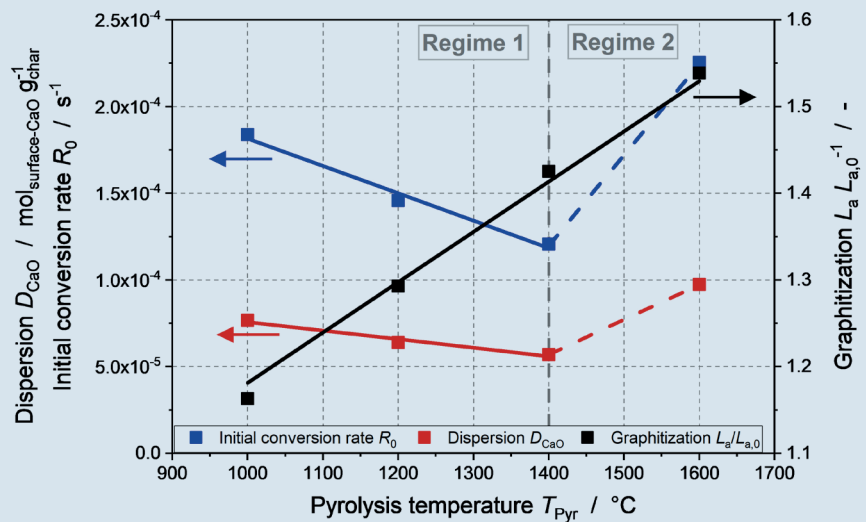
dieses Modellbrennstoffes kann am EBI ceb in einem atmosphärischen Hochtemperatur-Fallrohrreaktor durchgeführt werden, der sowohl für die Erzeugung des Pyrolysekokes unter inerten Bedingungen, als auch für die Untersuchung der Kokskinetik bei sehr schnellen Aufheizraten (104 K/s) verwendet werden kann.

Zur Untersuchung des Einflusses der Pyrolysebedingungen auf die Sekundärkoks-Eigenschaften (Morphologie, Graphitisierung, Aschedispersion) wurden Pyrolyseexperimente in Fallrohrreaktor zwischen 1000 °C und 1600 °C bei einer konstanten Verweilzeit von 200 ms durchgeführt. Die anschließenden Brennstoffcharakterisierungen wurden im Rahmen der Masterarbeit von Frau Stella Walker in Kooperation mit der Technischen Universität Luleå (LTU, Schweden) durchgeführt. **Bild 1.1** zeigt die Entwicklung von CaO Dispersion  $D_{CaO}$ , Graphitisierung ( $L_a/L_{a,0}$ ) und initialer Umsatzrate  $R_0$  (Vergasung

mit  $CO_2$  bei 750 °C in TGA) als Funktion der Pyrolysetemperatur  $T_{Pyr}$  [1].

Zwischen 1000 °C und 1400 °C ist eine lineare Abnahme der initialen Umsatzrate zu beobachten. Gleichermaßen sinkt die Aschedispersion bis 1400 °C. Bei 1600 °C steigen sowohl Umsatzrate als auch Aschedispersion steil an. Die Graphitisierung steigt stetig bis zu einer Pyrolysetemperatur von 1600 °C. Die Ursache für den starken Anstieg der Reaktivität bei 1600 °C konnte durch mikroskopische Aufnahmen der Koksfläche (REM/TEM) aufgeklärt werden. Die Aufnahmen weisen auf die Bildung eines CaO Films bei 1600 °C hin, der die Vergasungsreaktion mit  $CO_2$  selektiv katalysiert und somit die Reaktivität des Sekundärkokes erhöht. Zudem konnte mittels Physiosorption ein starker Abfall der Mikroporenoberfläche zwischen 1400 °C und 1600 °C beobachtet werden, der

**Bild 1.1:** Einfluss der Pyrolysetemperatur auf initiale Umsatzrate, CaO Dispersion und Graphitisierung zwischen 1000 °C und 1600 °C im Fallrohrreaktor [1]



**Bild 1.2 li,re:** Modellierung der Vergasungskinetik zweier Biomassekoke (P1400 und P1600) mit  $CO_2$ ,  $H_2O$  und Mischungen aus  $CO_2/H_2O$  [2].



durch die Bildung des CaO Films und damit einer Blockierung der Poren einhergeht.

Um die Auswirkungen der Koksseigenschaften auf die Heterogenreaktionskinetik zu untersuchen, wurden die bei 1400 °C (P1400) und 1600 °C (P1600) hergestellten Koksfraktionen im Hochdruck-Einzelpartikelreaktor mit CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und in Mischungen aus CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O umgesetzt. Inbetriebnahme und Durchführung von Experimenten mit CO<sub>2</sub> wurden im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Michael Zeller im Jahr 2019 durchgeführt. Eine Fortführung der Arbeiten einschließlich der Experimente in H<sub>2</sub>O und Mischungen aus CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O fand im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Daniel Böhm im Jahr 2020 statt. **Bild 1.2** zeigt die Reaktionsgeschwindigkeiten beider Sekundärkoks P1400 und P1600 für die verschiedenen Gasatmosphären. Die aus den Experimenten gewonnenen Daten wurden über zwei verschiedene reaktionskinetische Ansätze (Potenzansatz und Langmuir-Hinshelwood-Ansatz) modelliert. Die Vergasungsexperimente in Mischungen aus CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O wurden mittels einer Addition der Kinetik für die Einzelatmosphären modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Messwerte der CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O Vergasung mit P1400 im gesamten Druckbereich mithilfe der Addition der Kinetik der Einzelatmosphären zufriedenstellend beschrieben werden können. Somit herrscht keine Konkurrenz zwischen CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O um aktive Zentren auf der Koksoberfläche. Für die Vergasung von P1600 liefert dieser Ansatz nur im niedrigen Druckbereich eine gute Abbildung der Messwerte. Für höhere Partialdrücke der Eduktgase ist eine Sättigung festzustellen, die auf die deutlich kleinere spezifische Oberfläche und der stärkeren Graphitisierung der Probe P1600 im Vergleich zu P1400 zurückzuführen ist. Die beiden Eduktgase konkurrieren somit um die vergleichsweise niedrigere Anzahl

aktiver Zentren, wodurch ein inhibierender Effekt beobachtet werden kann.

Die gezeigten Ergebnisse sind Teil der Promotionsarbeit von Herrn Dipl.-Ing. Christoph Schneider.

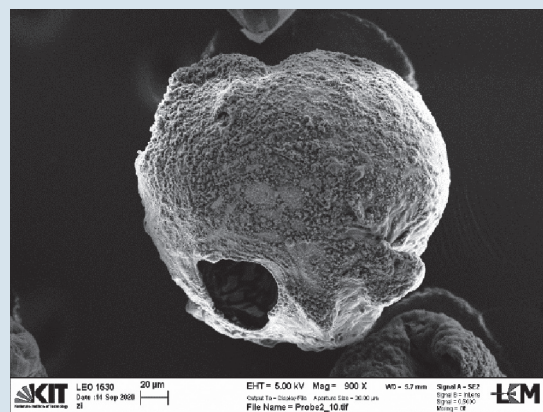
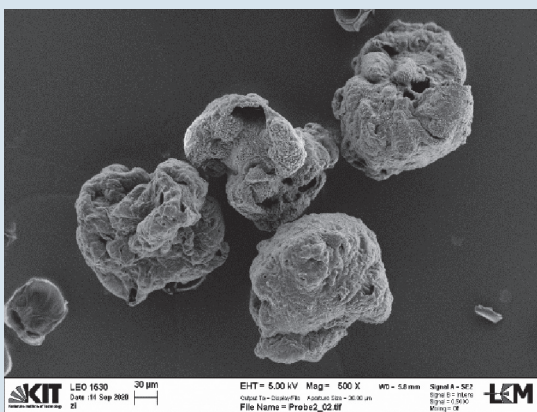
#### Literatur

- [1] Schneider, C.; Walker, S.; Phounglamcheik, A.; Umeki, K.; Kolb, T. (2021): Effect of calcium dispersion and graphitization during high-temperature pyrolysis of beech wood char on the gasification rate with CO<sub>2</sub>. *Fuel* 283(3), 118826. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118826.
- [2] Schneider, C.; Zeller, M.; Böhm, D.; Kolb, T. (2021): Influence of pressure on the gasification kinetics of two high-temperature beech wood chars with CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and its mixture. accepted in *Fuel*. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120523.

#### Thermo-chemische Umsetzung von biogenem Pyrolyseöl

Bei der Umsetzung eines biomassestämmigen Suspensionsbrennstoffs in einem Flugstromvergaser sind verschiedene parallel ablaufende Prozesse zu beobachten: nach der anfänglich reinen Verdunstung von flüchtigen Substanzen aus dem Pyrolyseöl kommt es bei höheren Tropfentemperaturen zu Zersetzungsreaktionen in der Flüssigphase, bei denen neben kurzkettingen, gasförmigen Kohlenwasserstoffen auch nicht verdampfende Komponenten gebildet werden. Diese bleiben zusammen mit den Kokspartikeln als Feststoff zurück.

Um die Prozesse in der flüssigen Phase in einer modelltechnischen Beschreibung abbilden zu können, werden experimentelle Untersuchungen zum Umsatzverhalten von biogenem Pyrolyseöl in einem Hochtemperatur-Fallrohr unter inerter Atmosphäre durchgeführt. Der technische Brennstoff wird in einer monodispersen Tropfenkette zusammen mit dem Trägergasstrom aus Stickstoff in das Reaktionsrohr eingeleitet und bei einer Gas-temperatur von 1000 °C und einer Verweilzeit von 600 ms



**Bild 1.3 li, re:** REM-Aufnahmen von Feststoffrückstand (Cenosphären) bei der Umsetzung von Pyrolyseöltropfen mit einem Durchmesser  $d_0$  von 363 µm in inerter Stickstoffatmosphäre bei 1000 °C und 600 ms Verweilzeit.

umgesetzt. Der nicht umgesetzte Brennstoff wird als fester Rückstand am Ende des Reaktionsrohrs aufgefangen. Dabei handelt es sich um feste, kugelförmige Hohlkörper, sogenannte Cenosphären. Diese entstehen, wenn schwersiedende Bestandteile des Pyrolyseöls bei höheren Temperaturen in der flüssigen Phase reagieren und langkettige Moleküle bilden. **Bild 1.3** zeigt REM-Aufnahmen dieser Cenosphären. Die Größe dieser Cenosphären liegt dabei bei einem Faktor 0,5 und 2 der ursprünglichen Tropfengröße.

Experimentelle Untersuchungen aus der Literatur zeigen unter vergleichbaren Versuchsbedingungen gleichfalls die Bildung von Cenosphären. Daraus abgeleitet wird ein mehrstufiger Umsatzverlauf, bestehend aus der anfänglichen Verdunstung der Leichtsieder, die mit steigender Tropfentemperatur zunehmenden Reaktionen der Schwersieder, die zur Feststoffbildung führen und der abschließenden Bildung der festen Hohlkörperstruktur. Gerade im Übergangsbereich zwischen Verdunstung und Sekundärpyrolyse kommt es zu einer Überlagerung von chemischen und physikalischen Prozessen, die eine Beschreibung der Vorgänge in einem Modell aktuell noch nicht möglich machen.

Um ein Verständnis für diese parallel ablaufenden Schritte zu entwickeln, sind weitere experimentelle Untersuchungen notwendig. Dabei soll vor allem der Einfluss der Gasphasentemperatur, Tropfengröße und Brennstoffzusammensetzung auf das Umsatzverhalten erfasst werden.

Neben der Untersuchung im Hochtemperatur-Fallrohrreaktor wird der Ansatz verfolgt, die komplexe Zusammensetzung des Pyrolyseöls durch einen Modellbrennstoff zu simulieren. Die erforderlichen Daten zur Beschreibung des Verdunstungs- und Zersetzungsverhaltens von Pyrolyseöl werden auf Basis der Siedelinie der Flüssigkeit entwickelt. Dazu erfolgt eine Auftrennung des technischen Brennstoffs mittels Vakuumdestillation in den leichtsiedenden und in einen nichtverdampfbaren Anteil. Mittels Siedelinie des verdampfbaren Anteils werden charakteristische Pyrolyseölkomponenten ausgewählt und in ihrer Zusammensetzung soweit angepasst, bis die Modellmischung die Siedelinie des leichtsiedenden Anteiles des Pyrolyseöls nachbildet. Durch diesen Ansatz kann das Verdunstungsverhalten des komplexen Mehrkomponentengemischs mit einer geringen Anzahl an Einzelstoffen in einem mathematischen Modell beschrieben und experimentelle Untersuchungen mit dem Modellbrennstoff zur Validierung des Modellansatzes durchgeführt werden.

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

Siegfried Bajohr, Rafael Becka, Mathias Held, Raphael Küchlin, Florian Nestler, Simon Sauerschell

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

Die EBI ceb Pilotanlage zur katalytischen Dreiphasen-Methanisierung (3PM) wurde im Jahr 2020 in mehreren Versuchskampagnen erfolgreich betrieben. Die Pilotanlage ist Teil des KIT-Projekts „Energy Lab 2.0“, bei dem mit Mitteln aus Bund und Land verschiedene Komponenten zukünftiger Energiesysteme im Pilotmaßstab realisiert und zu einem Anlagenverbund zusammengefasst werden.

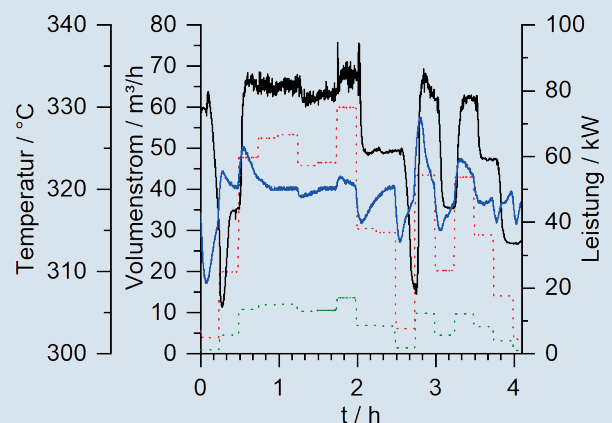
Bei der in **Bild 1.4** gezeigten Dreiphasen-Methanisierungsanlage des EBI ceb handelt es sich um die weltweit erste Anlage ihrer Art. Bei der Dreiphasen-Methanisierung wird ein in einer geeigneten Wärmeträger-Flüssigkeit suspendierter pulverförmiger Katalysator durch von unten in den Reaktor eintretendes Synthesegas aus  $H_2$  und  $CO_2$  fluidisiert.

Beim Aufsteigen der Gasblasen im Reaktor reagieren diese zu Wasserdampf und Methan, welches nach der anschließenden Aufbereitung als regenerativer Ersatz für fossiles Erdgas verwendet werden kann. Durch die exzellente Durchmischung aller drei Phasen werden Temperatur- und Konzentrationsgradienten vermieden und die stark exotherme Methanisierungsreaktion ist über alle Lastbereiche hinweg zuverlässig kontrollierbar, was bei anderen Reaktorkonzepten zur katalytischen Methanisierung sehr schwierig ist. Neben diesem Hauptvorteil zeichnet sich die Dreiphasen-Methanisierung auch durch hohe Dynamikfähigkeit und Robustheit aus, und ist daher besonders für dynamisch betreibbare Power-to-Gas-Prozessketten als wesentliche Bausteine der angestrebten Energiewende attraktiv.

In einer der im Jahr 2020 durchgeführten Messkampagnen wurden für das vom BMWi geförderte Projekt „Zellenübergreifende Regionalisierung der Energieversorgung durch betriebsoptimierte Sektorenkopplung – RegEnZell“ experimentelle Daten zum stationären und dynamischen Betriebsverhalten des 3PM-Reaktors bestimmt. In Kooperation mit dem KIT Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH) wurde hierzu ein Lastprofil gewählt, welches typischen Tagesmustern im Stromnetz entspricht. **Bild 1.5** zeigt einen Ausschnitt der im Realbetrieb dosierten Wasserstoff- und Kohlenstoffdioxidströme, die Reaktortemperatur und die heizwertbezogene Methan-Produktionsleistung aus einer einwöchigen Versuchskampagne. Ziel der Messreihe war, die Lastprofile im Stromnetz maßstabsbezogen, direkt an die Synthese gekoppelt und ohne ansonsten nötige Zwischenspeicher in den speicherbaren chemischen Energieträger Methan umzuwandeln. In den Versuchen



**Bild 1.4:** Fotografie der Dreiphasen-Methanisierung am „Energy Lab 2.0“ des KIT.



**Bild 1.5:** In blau: Reaktortemperatur, Edukt-Volumenströme gestrichelt in Grün: (H<sub>2</sub>) und in Rot: (CO<sub>2</sub>), in Schwarz: heizwertbezogene Methan-Produktionsleistung.

zeigte sich, dass selbst Lastsprünge von 100 % in weniger als einer Minute gefahrlos und mit einer maximalen Temperaturänderung im Reaktor von 10 K durchgeführt werden können.

Im Rahmen des BMWi-Projektes „MethQuest - Erzeugung und Einsatz von Methan aus erneuerbaren Quellen in mobilen und stationären Anwendungen“ konnte die 3PM-Anlage weiter ertüchtigt werden. Begleitende Laboruntersuchungen und Modellrechnungen am EBI ceb wurden durch insgesamt drei Wochen Versuchskampagne an der 3PM ergänzt. Da in diesem Projekt auch die Verschaltung mit einer überlastfähigen PEM-Elektrolyse untersucht werden sollte, wurde die für 100 kW Methanleistung ausgelegte Anlage im Rahmen einer Versuchskampagne für mehrere Stunden mit 200 % Auslegungslast betrieben. Auch unter diesen extremen Bedingungen bewährte sich die Dreiphasen-Methanisierung und es kam lediglich zu geringen Einbußen an erzielbarer Gasqualität und Umsatz.

Seit Ende 2020 werden Stabilitätsuntersuchungen hinsichtlich der im Reaktor vorliegenden Flüssigphase und des Katalysators durchgeführt, um noch bestehende Datenlücken zu füllen und die Qualität der Simulationsmodelle zu erhöhen. Momentan wird ein axiales Dispersionsmodell zur Beschreibung der Hydrodynamik, der Reaktionstechnik sowie der Stoff- und Wärmetransportvorgänge im Reaktor validiert. Mit diesem Modell kann das dynamische Betriebsverhalten des Reaktors theoretisch beschrieben und somit ein Scale-Up des Reaktors für industrielle Anwendungen durchgeführt werden. Diese Arbeiten sind vor allem Teil des BMBF-geförderten Projektes „SEKO - Energiesystemintegration & Sektorenkopplung am Beispiel der Forschungsinfrastrukturen Energy Lab 2.0 und Living Lab Energy Campus“.

Die Forschungsarbeiten zur Dreiphasen-Methanisierung werden im Rahmen der Promotionsarbeiten von Herrn M.Sc. Simon Sauerschell und Herrn M.Sc. Mathias Held durchgeführt.

### **Methanolsynthese**

Neben den zuvor vorgestellten Arbeiten zur Dreiphasen-Methanisierung wurde in 2020 auch die Methanolsynthese im Dreiphasenreaktor am EBI ceb weiter untersucht. Durch Verlagerung der Reaktion und der damit verbundenen Wärmefreisetzung in die flüssige Phase ist die Dreiphasen-Methanolsynthese bezüglich der Wärmeabfuhr vom Katalysator und aus dem Reaktor sowie der Lastwechselfähigkeit gegenüber etablierten Festbettverfahren im Vorteil. Dies konnte bereits in dem im Jahr 2019 abgeschlossenen BMBF-Verbundprojekt „OptiMeOH“ nachgewiesen werden. Bei der Untersuchung der Reaktionskinetik der Dreiphasen-Methanolsynthese wurde jedoch festgestellt, dass eine starke Wechselwirkung zwischen Katalysatoraktivität, Produktzusammensetzung und der Menge an eingesetztem Wärmeträgerfluid, welche durch Verdunstung im Laufe der Versuche leicht abnimmt, den Verlauf der Reaktion beeinflusst. Vor allem bei längeren und daher großtechnisch relevanten Versuchszeiten von mehreren Wochen, sowie beim Einsatz von CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle im Eduktgas, tritt diese Wechselwirkung in Form einer starken Abnahme der Menge an gebildetem Methanol als Funktion der Versuchszeit auf. Die systematische Untersuchung und Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Katalysatoraktivität, Produktzusammensetzung, CO<sub>2</sub>-Anteil im Eduktgas, sowie der Menge an eingesetztem Wärmeträgerfluid wurden im Jahr 2020 weiter fortgesetzt. Erste Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Menge an eingesetztem Wärme-

trägerfluid einen untergeordneten Einfluss auf das Reaktionsgeschehen ausübt, da die Ausbeute an produziertem Methanol während einer Versuchszeit von 312 h nahezu Null erreichte, in der gleichen Zeit jedoch weniger als 7 % Wärmeträgerfluid ausgetragen wurden. Der Fokus der Experimente liegt daher nun auf der Quantifizierung der chemischen Wechselwirkung sowohl zwischen Katalysator und Wärmeträgerfluid, als auch zwischen Katalysatoraktivität und CO<sub>2</sub>-Anteil im Eduktgas.

Neben den Forschungen zur Dreiphasen-Methanolsynthese am EBI besteht eine Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg in Form einer gemeinsam betreuten Promotionsarbeit zur Verfahrensentwicklung einer dynamisch betriebbaren Methanolsynthese im Festbettreaktor. Anhand einer örtlich aufgelösten Temperaturmessung in einer Technikums-Methanolsynthese-Apparatur wurde auch hier eine Verringerung der örtlichen Katalysatoraktivität über längere Versuchszeiträume von einigen Wochen bei erhöhtem CO<sub>2</sub>-Anteil im Eduktgas beobachtet, die als Folge das Temperaturprofil im Reaktor signifikant ändert.

Aufgrund der nachgewiesenen Wechselwirkungen zwischen CO<sub>2</sub>-reichem Synthesegas und Katalysatoraktivität in der Zwei- sowie Dreiphasen-Methanolsynthese wird in 2021 am EBI ein Zweiphasen-Zapfstellenreaktor aufgebaut, der neben orts aufgelöster Temperaturmessung auch eine orts aufgelöste Konzentrationsmessung im Reaktor erlaubt. Durch Kombination von orts aufgelöster Temperaturmessung und bzw. Edukt- und Produktkonzentrationen können lokal ablaufende Reaktionen mit Temperaturspitzen und Ad- und Desorptionsvorgängen identifiziert werden, welche die Aktivitätsänderung des Katalysators begründen und durch konventionelle, integrale Messungen nicht nachgewiesen werden können.

Die Forschungsarbeiten zur Methanolsynthese werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn M.Sc. Rafael Becka am EBI ceb und Herrn M.Sc. Florian Nestler am Fraunhofer ISE durchgeführt.

#### 1.4.3 Arbeitsgruppe „Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung“

Frank Graf, Friedemann Mörs, Tobias Stegmaier

Brennstoffe müssen für die meisten technischen Anwendungen strenge Anforderungen bezüglich Reinheit und Zusammensetzung einhalten. Hierzu sind entsprechend energieeffiziente Prozessstufen nötig, die vor allem den Reinigungs- und Regenerationsaufwand minimieren. Teilweise kann die Brennstoffaufbereitung auch in den eigentlichen Erzeugungs- oder Umwandlungsprozess integriert werden und so eine vorteilhafte Kombination aus Erzeugung/Umwandlung und Aufbereitung ermöglichen. Derzeit werden in der Arbeitsgruppe insbesondere

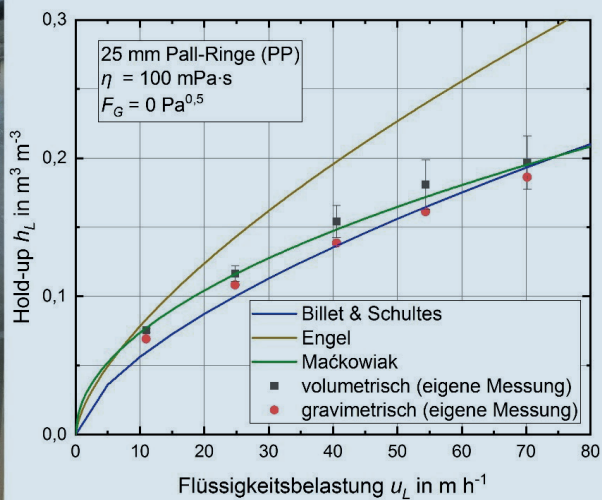
neuartige Konzepte zur Bereitstellung von gasförmigen Brennstoffen aus erneuerbaren Quellen wie Biomethan erforscht und auf ihre Eignung zur Prozessoptimierung etablierter Verfahren oder zur Entwicklung neuer Verfahren hin bewertet. Einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten stellt die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> aus unterschiedlichen Quellen für PtX-Prozesse dar. Außerdem werden grundlegende Untersuchungen zu Hydrodynamik und Stoffübergang in Dreiphasen-Systemen wie Füllkörperkolonnen oder Blasensäulenreaktoren durchgeführt.

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

In der thermischen Verfahrenstechnik sind Packungskolonnen gängige Apparate zur Intensivierung des Stofftransports in Gas/Flüssigkeits-Systemen, z. B. bei der Absorption. Dabei wird die Packungskolonne in der Regel im Gegenstrom betrieben, wobei das Feedgas im Sumpf der Kolonne eingeführt wird, während die Absorptionsflüssigkeit am Kolonnenkopf über die Packung verteilt wird. Die Flüssigkeit fließt anschließend in Form von Rieselströmen oder in Gestalt von Tropfen gravitationsbedingt durch die Packung herab. Dabei wird sie mit dem aufsteigenden Gasstrom in Kontakt gebracht, wodurch eine Komponente des Feedgases, wie beispielsweise CO<sub>2</sub>, selektiv in die Waschflüssigkeit absorbiert. Die Packung sorgt hierbei für eine gleichmäßige Verteilung der Flüssigphase und eine größere effektive Stoffaustauschfläche zwischen Gas und Flüssigkeit, wodurch der Stofftransport bei minimalem Druckverlust verbessert werden kann.

Am Engler-Bunte-Institut wird seit mehreren Jahren ein neuartiges Absorptionsverfahren zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus unterschiedlichen Gasgemischen entwickelt, welches den Einsatz von chemisch-funktionalisierten ionischen Waschflüssigkeiten (IL) in einem innovativen Aufbereitungskonzept vorsieht. Aufgrund des vernachlässigbaren Dampfdrucks der IL ermöglicht dieses Verfahren gegenüber herkömmlichen Gaswäschen signifikante Energieeinsparungen. Die im Vergleich zu Wasser hohe Viskosität und niedrige Oberflächenspannung von ILs führen jedoch zu Stofftransportlimitierungen bei der Absorption von CO<sub>2</sub>. Der Stofftransport zwischen Gas und Flüssigkeit innerhalb der Kolonne ist hierbei hauptsächlich von den vorliegenden Phasenanteilen der Flüssigphase (Film, Rinnsale, Tropfen) und der sich ausbildenden Phasengrenzfläche abhängig. In der Literatur finden sich jedoch hauptsächlich Korrelationen, die Wasser als Modellmedium verwenden (z. B. Billet & Schultes<sup>1</sup> oder

<sup>1</sup> Billet, R.; Schultes, M.: Trans IChemE 77 (1999), 498-504.



**Bild 1.6 li:** Die DN250 Absorptionskolonne zur Bestimmung der Hydrodynamik und des Stoffübergangs in Packungs- und Füllkörperkolonnen im Testbetrieb mit Wasser

**Bild 1.6 re:** Gemessener Hold-Up für 25 mm Pall-Ringe Abhängigkeit von der Flüssigkeitsbelastung bei einer Viskosität von 100 mPa·s und Vergleich mit Korrelationen aus der Literatur.

Mackowiak<sup>2</sup>). Diese sind somit aufgrund der sich stark unterscheidenden Stoffeigenschaften nicht für ILs zulässig. Um die Hydrodynamik und den Stofftransport mit IL bei der Absorption von  $\text{CO}_2$  in ausreichender Güte modellieren zu können, sind somit weitere experimentelle Untersuchungen mit höherviskosen Modellmedien notwendig.

Hierfür werden am EBI ceb im Rahmen des 2018 gestarteten BMWi-Leitprojektes „MethQuest“ an einer Versuchsanlage im Technikumsmaßstab (siehe **Bild 1.6 links**) experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um den Stofftransport bei der Absorption von  $\text{CO}_2$  mit IL in ausreichender Güte modellieren zu können. Dadurch soll ein allgemein gültiges Stofftransportmodell für viskose Flüssigkeiten in Packungskolonnen erstellt und validiert werden, um eine optimale Auslegung bei der Gasaufbereitung mit IL zu ermöglichen. Die Anlage wurde gemäß den Vorgaben VDI-Richtlinie 2761 „Thermische Trennverfahren in der Verfahrenstechnik; Messung und Auswertung von Fluidodynamik und Stofftransport in gepackten Kolonnen“ ausgelegt. An der Anlage kann der Flüssigkeitsinhalt der Packung (engl. Hold-Up) in Abhängigkeit von den eintretenden Masseströmen sowohl gravimetrisch als auch volumetrisch gemessen werden. Außerdem kann über eine Messung der Gaszusammensetzung am Ein- und Auslass der Kolonne der volumetrische Stoffübergangskoeffizient  $k_{L,\text{eff}}$  bestimmt werden.

Zur Validierung der Anlage wurden Stofftransportmessungen mit dem Stoffsystem  $\text{CO}_2$ /Luft-Wasser durchgeführt. Die Untersuchung über den Einfluss der Flüssigkeitsbelastung ergab, dass der flüssigseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizient  $k_{L,\text{eff}}$  mit zunehmender

Flüssigkeitsbelastung von  $0,007 \text{ s}^{-1}$  bei  $u_L = 25 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  auf  $0,027 \text{ s}^{-1}$  bei  $u_L = 97 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  zunehmen. Dieser Trend deckt sich mit der Korrelation von Billet und Schultes.

Zur Untersuchung des Einflusses der Packungshöhe auf den flüssigseitigen volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten wurde die Packungshöhe zwischen 1,00 m und 0,45 m variiert. Die Untersuchung zeigte, dass  $k_{L,\text{eff}}$  mit abnehmender Packungshöhe zunimmt. Mit abnehmender Packungshöhe wurde ein annähernd linear zunehmender flüssigseitiger volumetrischer Stoffübergangskoeffizient festgestellt. Damit wurde gezeigt, dass die Überschätzung des Stoffübergangskoeffizienten mit abnehmender Packungshöhe zunimmt. Die Überschätzung ist auf den Einfluss von externen Endeffekten zurückzuführen. Externe Endeffekte beschreiben den Stoffübergang ober- und unterhalb der Packung im Inneren der Kolonne. Um dies quantifizieren zu können, werden Probeentnahmestellen innerhalb der Packung installiert, so dass die Gaszusammensetzung in verschiedenen Höhen der Packung gemessen werden kann.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Viskosität auf den Hold-Up in Packungskolonnen untersucht. Die untersuchten Viskositäten der Flüssigkeiten befanden sich im Bereich von  $25 \text{ mPa}\cdot\text{s} < \eta < 100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Die experimentellen Untersuchungen des Hold-Ups wurden für eine Schüttung aus 25 mm Pall-Ringen (PP) und einer strukturierten Packung Mellapak 250 Y durchgeführt. Zusammenfassend konnte die Aussage getroffen werden, dass auch für höher viskose Flüssigkeiten das Modell nach Billet & Schultes<sup>1</sup> den Hold-Up gut beschreibt (vergleiche **Bild 1.6 rechts**). Die großen Abweichungen bei Stoffübergangskorrelationen für viskose Flüssigkeiten können somit nur zu geringem Teil auf eine falsche Abschätzung des Hold-Up zurückgeführt werden. Es

<sup>2</sup> Mackowiak, J.: Chem. Eng. Research and Design 89 (2011), 1308-1320.

lässt sich eher vermuten, dass die lokale Flüssigkeitsverteilung und die entsprechend entstehende lokale effektive Oberfläche unzureichend beschrieben werden. Dies kann nur durch lokale Stoffübergangsmessungen in den Packungen oder optischen Messmethoden genauer untersucht werden.

### Hydrodynamik und Stofftransport in Blasensäulenreaktoren

In (Suspensions-)Blasensäulenreaktoren wird das gasförmige Edukt in eine Flüssigkeit bzw. Suspension dispergiert. In Form von Blasen steigt die Gasphase durch die Flüssigkeit/Suspension auf. Die zunächst in Ruhe befindliche Suspension/Flüssigphase wird durch die aufsteigende Blasenströmung beschleunigt. Dies führt zu einer Zirkulation und Durchmischung der Flüssigphase. Diese Zirkulation beeinflusst wiederum die Blasenbewegung und somit die Verweilzeit der Gasphase im Reaktor. Durch den hohen Anteil an Flüssigkeit im Reaktor zeichnet sich der Blasensäulenreaktor durch seine sehr guten

Wärmetransporteigenschaften aus. Zum einen besteht ein effektiver Wärmetransport zwischen den im Blasensäulenreaktor vorliegenden Phasen (Gasphase, Flüssigkeit und Katalysatorpartikel), was lokale Hotspots bei stark exothermen Reaktionen verhindert. Zum anderen kann freigesetzte Reaktionswärme sehr gut über die Reaktorwände bzw. Kühlrohre abgeführt werden. Dadurch ist auch bei einer lastflexiblen Fahrweise mit schnellen Lastwechselraten ein nahezu isothermer Betrieb des Reaktors gewährleistet. Hierdurch werden eine hohe Katalysatorausnutzung und eine gleichbleibend hohe Produktselektivität erzielt.

Am EBI ceb wird der Einsatz von Suspensions-Blasensäulenreaktoren für die katalytische und biologische Methanisierung (PtG) und die Fischer-Tropsch-Synthese (PtL) untersucht. Im Rahmen der Energiewende wird über diese Verfahren erneuerbarer Strom aus fluktuierenden Quellen wie Wind- und Solarenergie in chemische Energieträger umgewandelt. Wie oben beschrieben, ist der Blasensäulenreaktor ein ideales Reaktorkonzept für die lastflexible Fahrweise einer PtG/PtX-Prozesskette.

Um die genannten Vorteile des Reaktorkonzepts für PtG/PtL-Prozesse vollumfänglich zu nutzen, muss eine verlässliche Auslegung von Blasensäulenreaktoren gegeben sein. Der Blasensäulenreaktor ist hinsichtlich der Reaktorgestaltung besonders anspruchsvoll, da neben der chemischen Reaktion auch der Stofftransport und die Hydrodynamik im Reaktor beachtet werden müssen. Der Stofftransport umfasst dabei den Stoffübergang innerhalb der Medien als auch den Stofftransport zwischen den Medien und hängt wesentlich von der Hydrodynamik in Blasensäulen ab. Die Hydrodynamik in Blasensäulen (siehe **Bild 1.7**) wird insbesondere durch die folgenden Größen beschrieben:

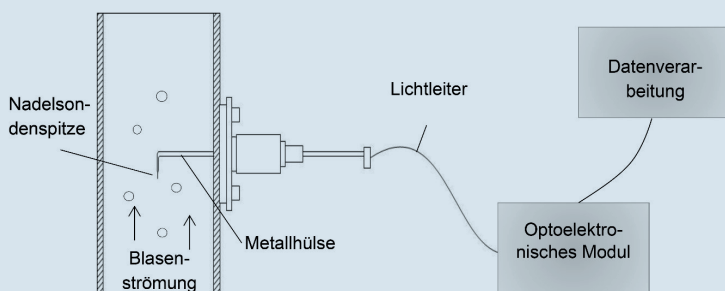
- Blasengröße  $d_B$
- Blasengeschwindigkeit  $u_B$
- Relativer Gasgehalt  $\epsilon_G$

Heutzutage basiert die Auslegung von Suspensions-Blasensäulenreaktoren in der Regel auf empirischen Korrelationen. Die Korrelationen beschreiben insbesondere die komplexen Zusammenhänge der zuvor aufgeführten Größen ( $d_B$ ,  $u_B$ ,  $\epsilon_G$ ) nur unzureichend. In einem Buchbeitrag [3] wurde dazu ein Überblick über die physikalischen Zusammenhänge der Hydrodynamik in Blasensäulen veröffentlicht, auf dessen Basis zur Verfügung stehende Korrelationen kritisch bewertet werden können.

Zum besseren Verständnis der hydrodynamischen Vorgänge und für eine erhöhte Verlässlichkeit der Auslegungskriterien von Blasensäulenreaktoren werden am EBI ceb die lokalen Vorgänge in Blasenströmungen (z. B. Blasenbildung, -koaleszenz und -zerfall) detailliert untersucht. Hierzu werden neben der Messung des integralen



**Bild 1.7:** Hydrodynamik in Blasensäulen im homogenen Strömungsregime:  $d_R = 100$  mm, Wasser/Luft.

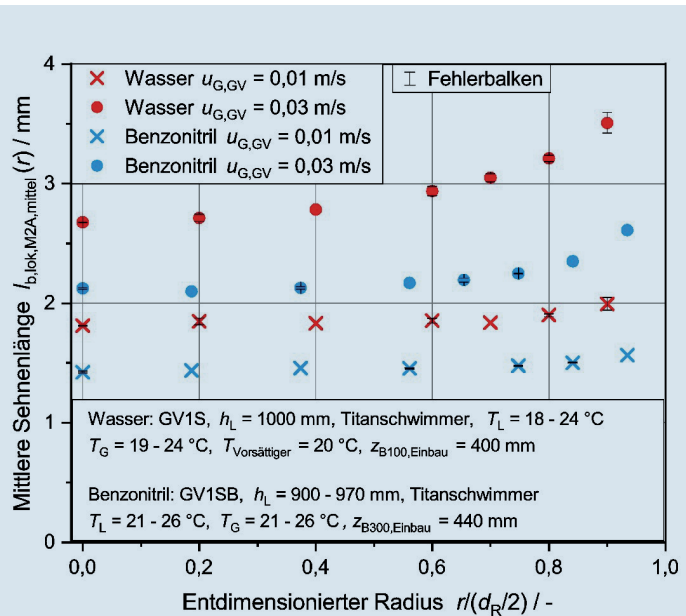


**Bild 1.8:** Messaufbau zur Messung der hydrodynamischen Größen mit der optischen Nadelsonde.

relativen Gasgehalts lokale Messungen der Blasengröße, der Geschwindigkeit und des Gasgehalts in Blasenströmungen durchgeführt.

Da die optische Zugänglichkeit der Blasenströmung bei hoher Blasendichte (relativer Gasgehalt  $\varepsilon_G > 5 - 10 \%$ ) und bei Einsatz von Suspensionen stark eingeschränkt ist, wird für lokale Messungen in Blasenströmungen eine optische Nadelsonde eingesetzt (Bild 1.8). Die Spitze der Nadelsonde besteht aus Glas mit einer konischen Spitze ( $d_{\text{Glas}} = 125 \mu\text{m}$ ). Über einen Lichtleiter wird Laserlicht in die Glasspitze eingekoppelt, welches teilweise an der Spitze reflektiert wird. Dabei hängt die Intensität der Reflexion vom Brechungsindex des an der Spitze umgebenden Fluides ab. Über die Messung der Reflexion kann auf Grund von unterschiedlichen Brechungsindizes zwischen Gas- und Flüssigphase unterschieden werden. Die Nadelsonde ist dabei senkrecht nach unten ausgerichtet, wodurch die aufsteigenden Blasen von oben nach unten durchstochen werden. Aus dem zeitlichen Signalverlauf beim Durchstechen einer Blase kann die Blasen Geschwindigkeit und durchstochene Sehnenlänge  $l_B$  ermittelt werden. Weiterhin lässt sich der relative Gasgehalt aus der Zeit bestimmen, in welcher die Nadelsonde von der Gasphase umgeben wird.

Bisher wurde die optische Nadelsonde im Stoffsystem Wasser/Luft bei Variation des Gasverteilers und der Gasgeschwindigkeit erprobt. Um den Einfluss der Stoffeigenschaften der Flüssigphase zu untersuchen, wurde in aktuellen Arbeiten die Messtechnik auf weitere Modellstoffsysteme übertragen. In Bild 1.9 ist der Vergleich der gemessenen Sehnenlänge für zwei Modellstoffsysteme mit unterschiedlicher Oberflächenspannung gezeigt. Für beide Gasgeschwindigkeiten  $u_{G,GV}$  weist das Stoffsystem Benzonitril/Luft ( $\sigma_{\text{Benzonitril}} < \sigma_{\text{Wasser}}$ ) eine kleinere Sehnenlänge im Vergleich zum Stoffsystem Wasser/Luft auf. Da die Messungen im homogenen Strömungsregime durchgeführt wurden, kann der Einfluss von Blasenkoaleszenz und -zerfall auf die gemessene Sehnenlänge (Blasengröße) ausgeschlossen werden. Demnach wird die Blasengröße durch die Blasenbildung am Gasverteiler festgelegt. Daher müssten die am Gasverteiler gebildeten Blasen im Stoffsystem Benzonitril/Luft einen geringeren Durchmesser aufweisen als im Stoffsystem Wasser/Luft. Jedoch ist zu beachten, dass die Blasenform (elliptische Blase) ebenfalls einen Einfluss auf die gemessenen Sehnenlängen hat. Je stärker eine Blase beim Blasenauftieg verformt wird, desto flacher ist die Blase, und desto geringer ist die gemessene Sehnenlänge. Um auf Basis von Nadelsondenmessungen in Blasenströmung eine quantitative Aussage bzgl. der Blasengröße zu treffen, muss wie oben diskutiert auch die Form der Blasen bekannt sein. Für diesen Zweck wird in bevorstehenden Arbeiten eine Nadelsonde mit zwei



**Bild 1.9:** Einfluss der Oberflächenspannung auf die gemessene Sehnenlänge durch Vergleich der Stoffsystem Wasser/Luft ( $\sigma = 72 \text{ mN/m}^2$ ) und Benzonitril/Luft ( $\sigma = 39 \text{ mN/m}^2$ ) bei gleicher Flüssigkeitsviskosität und -dichte.

parallelen Spitzen eingesetzt. Über diese Nadelsonden können zusätzliche Informationen über die Form der Blasen gewonnen werden. Damit lassen sich voraussichtlich qualitative Aussagen bzgl. der Blasengröße treffen.

#### Literatur

- [3] Mörs, F.; Graf, F.; Kolb, T. (2019): Reaktoren für Dreiphasen-Reaktionen: Suspensionsreaktoren. In: Reschetilowski, W. (Hrsg.): Handbuch Chemische Reaktoren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

#### 1.4.4 Arbeitsgruppe „Katalytische Synthesen/chemische Energiespeicherung/neue Bioenergieträger“ Reinhard Rauch, Philipp Gräfe, David Graf, Philipp Neuner

Der Verkehrssektor hat von allen Sektoren noch immer den geringsten Anteil von erneuerbaren Energieträgern. Es ist deshalb von hoher Priorität, die Energieträger Benzin, Diesel und Kerosin aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen. Basierend auf erneuerbaren Rohstoffen bieten sich vor allem das Fischer-Tropsch- und das Methanol-to-Gasoline-Verfahren (MtG) an, diese Kraftstoffe zu synthetisieren und in bestehende Raffinerien zu integrieren. Beide Technologien werden am KIT erfolgreich demonstriert, wie etwa mit dem bioliq®-Prozess zur Erzeugung von Benzin aus Stroh. Beide katalytischen Routen bringen auch Herausforderungen mit sich. Die Fischer-Tropsch-Synthese erzeugt durch einen auf Wachstumswahr-

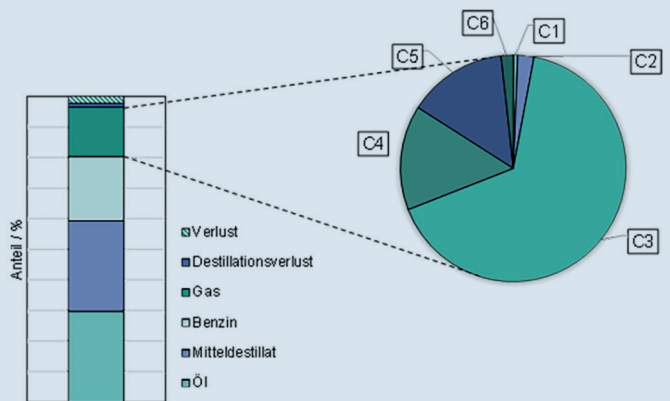
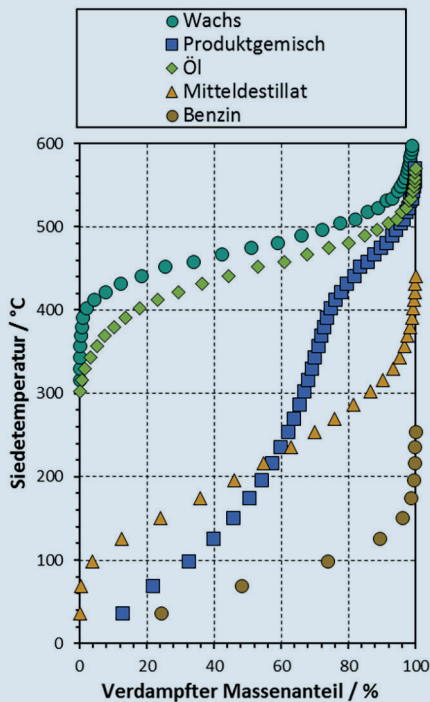


Bild 1.10: Siedebereiche der erzeugten Fraktionen, mittels Gaschromatographie bestimmt.

Bild 1.11: Ausbeuten der unterschiedlichen Fraktionen nach der Destillation.

scheinlichkeit von Kohlenwasserstoffketten beruhenden Mechanismus als Hauptprodukt Diesel. Als Nebenprodukte fallen zu einem nicht vernachlässigbaren Teil auch langkettige Wachse an. Das beim MtG-Verfahren erzeugte synthetische Benzin bietet aufgrund des hohen Aromatengehaltes viele Vorteile. Gleichzeitig bringen hochmolekulare Aromaten wie etwa Durol (1,2,4,5-Tetramethylbenzol,  $C_{10}H_{14}$ ) Probleme bei der motorischen Verbrennung mit sich. Für beide Verfahren ist es deshalb essentiell, die anfallenden Nebenprodukte energetisch oder stofflich zu verwerten. Dabei bietet sich das *Hydroprocessing* aufgrund der hohen Prozessvariabilität besonders an.

**Hydroprocessing von Fischer-Tropsch-Wachsen**

Im Jahr 2020 lag der Fokus beim Processing von FT-Wachs auf der Produktion von Weißölen und leichteren Kraftstoffen. Hierdurch kann das Produktspektrum um wertvolle Alternativen erweitert werden. Zwar wird katalytisches Dewaxing bereits kommerziell eingesetzt, allerdings steckt ein Großteil des Knowhows zur synthetischen Weißölproduktion aus Fischer-Tropsch-Wachsen in Patentliteratur. Diese gibt den generellen Pfad zur Herstellung eines solchen Produktes an, es wird aber nicht weiter auf Abhängigkeiten und Prozessparameter eingegangen. Typische Einsatzgebiete von Weißölen sind Schmiermittel für technische Geräte wie bspw. Fahrradketten oder auch pharmazeutische Anwendungen, bei letzterem ist allerdings ein sehr hoher Rein-

heitsstandard gefordert, der mehrere Prozessschritte benötigt. Im Jahr 2020 wurden zunächst Studien zur Abhängigkeit der Viskosität und des Trübungspunkts von Reaktionstemperatur und -druck (Cloud-Point, CP) durchgeführt.

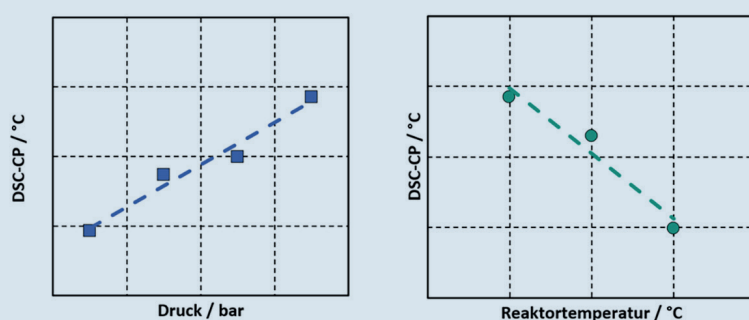
Zunächst mussten die signifikanten Unterschiede zwischen Wachs und Öl definiert werden. In beiden Fällen wird erwartet, dass sich die Produkte beim Erhitzen nicht verflüchtigen, allerdings ist Öl im Allgemeinen bei Raumtemperatur flüssig, wohingegen klassisches Wachs fest ist. Das bedeutet, dass bei der Umwandlung von Wachs zu Öl ein hoher Siedebereich bei gleichzeitig absinkendem Schmelzpunkt angestrebt wird. Dies schließt ein Cracken der Kohlenwasserstoffe aus, da das zu einem sehr starken Absinken der Siedetemperatur führen würde. Es muss also möglichst selektiv isomerisiert werden. Hierzu wurde ein emporiger, schwach saurer Katalysator mit AEL Struktur gewählt. Dieser war in der Lage die langkettigen Kohlenwasserstoffe zu isomerisieren und Öle mit einer Viskosität im Bereich 30 - 40 mPa. s zu erzeugen. Exemplarische Ausbeuten und die Siedebereiche sind in **Bild 1.10** und **1.11** dargestellt.

Es hat sich gezeigt, dass je nach Reaktionsbedingungen 28 - 50 Ma.-% als Schwersieder zurückbleiben. Gleichzeitig entstehen 13 - 31 Ma.-% Gasphase. Der Rest entfällt auf die flüssigen Kraftstoffe. Hier gilt es noch ein ökonomisches Optimum zu finden, da hohe Gasausbeuten wirtschaftlich unerwünscht sind.





**Bild 1.12:** Farbänderung der produzierten Öle bei steigendem Druck.



**Bild 1.13:** Abhängigkeiten des Cloud-Points der Ölfraktion von Druck und Reaktortemperatur.

Abhängig von den Reaktionsbedingungen trat gelegentlich eine unerwünschte Färbung des Öls auf. Eine Einfärbung bei Kohlenwasserstoffen weist auf eine erhöhte Anzahl ungesättigter Verbindungen hin. Diese sind reaktiv und können die Langlebigkeit der Öle beeinträchtigen. Um eine Sättigung der Produkte zu erreichen, wurde der Wasserstoffdruck schrittweise erhöht. Diese Ergebnisse sind in **Bild 1.12** dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass auch in einem einstufigen Prozess ein klares und farbloses Öl produziert werden konnte.

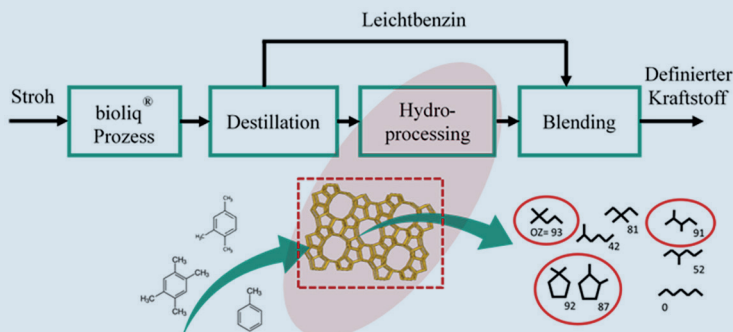
Die wichtigste Frage bei der Produktion von Weißölen ist allerdings die nach den Kaltfließigenschaften. Diese können anhand unterschiedlicher Parameter beurteilt werden. Bei Diesel wäre es beispielsweise der Cold Filter Plugging Point (CFPP), also der Punkt, an dem der Treibstoff nicht mehr durch einen standardisierten Filter fließen kann. Bei Ölen gibt es den sogenannten Tropfpunkt, dieser ist ein Maß für die Fließfähigkeit des Öls bei definierten Temperaturen. Bei beiden Stoffklassen gibt es zudem den Cloud-Point (CP) als Referenz. Dieser ist die Temperatur, bei der die ersten Paraffinkristalle gebildet werden. Die Flüssigkeit behält allerdings ihre Fließfähigkeit, was bedeutet, dass die anderen genannten Eigenschaften unterhalb des CPs liegen müssen. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Cloud-Point mittels dynamischer Differenzkalorimetrie bestimmt werden kann. Das ist eine Messung, die geringen Zeitaufwand und Probenmenge (ca. 10 mg pro Messung) benötigt. Hierdurch war es möglich das Kälteverhalten der Öle in Abhängigkeit von Reaktionsdruck und

-temperatur zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in **Bild 1.13** dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass der CP mit steigendem Reaktionsdruck zunimmt. Dies ist auf die katalytische Inhibierung durch den Wasserstoff bei der Carbeniumionbildung zurückzuführen. Gleichzeitig konnte dem durch erhöhte Temperatur entgegengewirkt werden. Hier gilt es ebenfalls noch ein wirtschaftliches Optimum, bzw. einen Kompromiss aus Ölausbeute, CP und Energieaufwand bei der Prozessführung zu bestimmen.

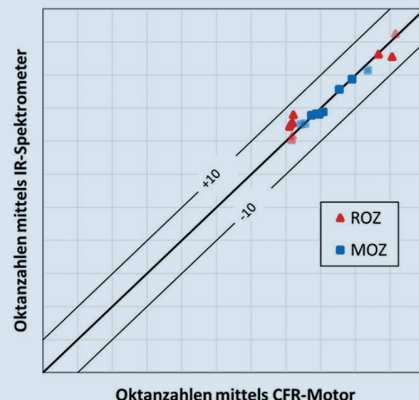
Die Forschungsarbeiten zum Hydroprocessing von Fischer-Tropsch-Wachsen werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn M.Sc. Philipp Neuner durchgeführt.

#### **Aufbereitung einer biostämmigen Schwerbenzinfraction**

Die hier vorgestellte Arbeit zum *Upgrading* einer biostämmigen Schwerbenzinfraction gliedert sich in das Projekt „reFuels - Kraftstoffe neu denken“ ein. Das Projekt beleuchtet neben technisch-wissenschaftlichen Fragestellungen auch solche aus der Ökonomie sowie der Gesellschaft. Die Kraftstoffe werden in diesem Zusammenhang nicht nur von der Bereitstellung bis hin zur Nutzung bewertet, es soll beispielsweise ebenso geklärt werden, wie eine breite Akzeptanz in der Bevölkerung erzielt werden kann. Die Arbeiten, welche am Engler-Bunte-Institut in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Rauch durchgeführt werden, sind in das Cluster A – „reFuels - Bereitstellung“ eingebunden.



**Bild 1.14:** Prozessschema der Kraftstoffsynthese und des Schwerbenzin-Upgradings.



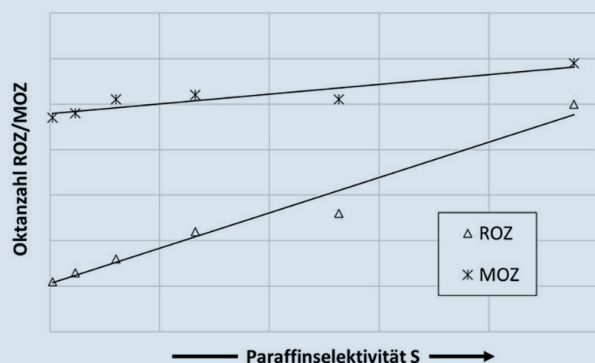
**Bild 1.15:** Paritätsplot zu den Oktanzahlen (ROZ/MOZ), aufgetragen sind die mittels IR-Spektrometrie bestimmten über denen im CFR-Motor gemessenen Oktanzahlen.

Zunächst erfolgt die Synthese eines biostämmigen Kraftstoffes basierend auf Stroh mit der auf dem Campus Nord des KIT betriebenen bioliq®-Anlage (siehe auch **Bild 1.14**). Das Benzin wird im nachfolgenden Prozessschritt über eine Destillation in eine Leicht- und Schwerbenzinfraction getrennt. Das Leichtbenzin ( $\leq C_8$ ) steht im Anschluss für Flottentests bei Industriepartnern zur Verfügung. Die Schwerbenzinfraction ( $C_9 - C_{12}$ ), die prozessbedingt reich an dem schweren Aromaten Durol ( $C_{10}$ ) ist, führt unter anderem bei der motorischen Verbrennung zu Problemen. Aufgrund der hohen Schmelztemperatur besteht die Gefahr von Verblockungen im Motor, außerdem sind die Verbrennungseigenschaften nicht optimal, wodurch es zu starken Partikelemissionen kommt. Aus diesem Grund wird die Fraktion einem *Upgrading* unterzogen, welches am EBI ceb näher untersucht wird. Die Zielsetzung des *Upgradings* besteht in der Herstellung einer hochwertigen Blending-Komponente, welche später der Leichtbenzinfraction beigemischt wird.

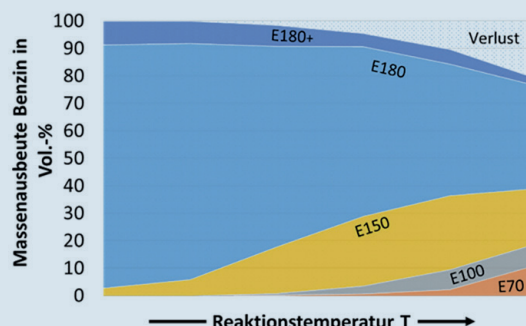
Für das *Upgrading* wird als erster Prozessschritt das Hydrieren der schweren Aromaten hin zu Naphthenen untersucht. Das Ziel dieser Maßnahme besteht darin, die  $C_9 - C_{12}$ -Aromaten in Naphthene umzuwandeln, welche weniger Emissionen bei der motorischen Verbrennung erzeugen. Besonderes Augenmerk liegt bei Otto-Kraftstoffen jedoch auf der Oktanzahl, welche nach der DIN EN 228 einen Mindestwert von 95 für die ROZ und 85 für die MOZ aufweisen muss. Im etablierten Raffineriebetrieb wird dies durch ein Beimischen von Aromaten erreicht. In den benzintypischen Siedeschnitten sind dies Toluol- und Xylol-Isomere, welche das Klopfverhalten einstellen. Das Ziel der vorliegenden Aufgabenstellung ist, eine möglichst hohe Klopffestigkeit unter Abwesenheit von Aromaten bei der hydrierten Fraktion einzustellen, da andernfalls die Gefahr bestünde, dass nach dem *Blending* die durch

die Norm vorgegebenen Oktanzahl nicht erreicht wird. Die Hydrierung der aromatenreichen Fraktion führt immer zu einer Abnahme der Oktanzahl, zudem sinkt sie mit zunehmender Molekülgröße tendenziell noch weiter. Um dem entgegenzuwirken, wird als zweiter Reaktionsschritt ein *Hydroprocessing* durchgeführt, welches einen etablierten Prozess darstellt, um die Klopffestigkeit von Molekülen durch strukturelle Umlagerungen (Isomerisierung) zu erhöhen. Bei Naphthenen kommt es neben der Umlagerung von Alkylgruppen auch zu einer Ringschrumpfung. Diese führt zu einer Verkleinerung der  $C_6$ - hin zu einer  $C_5$ -Ringstruktur. Besonders die geschrumpften Ringe versprechen eine Erhöhung der Oktanzahl, wohingegen sich lange Alkylketten analog zu linearen Paraffinen negativ auswirken. Des Weiteren entsteht beim *Hydroprocessing* durch das Aufbrechen von Ringstrukturen in Abhängigkeit des eingesetzten Katalysators eine signifikante Menge an Paraffinen. In Vorversuchen (März bis November 2019) wurden zunächst potentielle Katalysatoren auf ihre Eignung für den Prozess untersucht. Als besonders vielversprechend erwiesen sich bifunktionelle Edelmetall-Zeolith-Katalysatoren, die sowohl an der Edelmetallkomponente die Hydrierung katalysieren als auch Isomerisierungs- und Cracking-Reaktionen an den sauren Zentren des Zeolithen. Basierend auf den Vorversuchen war es möglich, Rückschlüsse auf die Aktivität und Selektivität der ablaufenden Reaktionen zu ziehen.

Die Selektivität drückt sich maßgeblich in der Oktanzahl aus. Diese zu bestimmen gestaltete sich allerdings als Herausforderung, da für die Messung in einem sogenannten CFR-Motor ein Probevolumen von mindestens 2 L erforderlich war. Im labortechnischen Maßstab wurde dies durch mehrwöchige Dauerversuche umgesetzt, war allerdings für viele Proben wegen des hohen Zeitaufwandes wenig praktikabel. Aus diesem Grund wurde Anfang



**Bild 1.16:** Abhängigkeit der Oktanzahlen (ROZ/MOZ) von der Paraffinselektivität.



**Bild 1.17:** Benzinausbeute, dargestellt anhand der E-Werte in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur.

2020 eine Methode entwickelt, um die jeweiligen Oktanzahlen anhand einer infrarotspektroskopischen Messung zu ermitteln. Die multivariate Datenanalyse bietet zusätzlich eine Analyseverfahren, die in einem breiten spektroskopischen Bereich mehrere Wellenlängen gleichzeitig einer Regression unterziehen kann. Dies war erforderlich, da komplexe Molekülstrukturen ein dementsprechend vielseitiges IR-Absorptionsspektrum aufweisen und die Konzentration wegen Überlagerungen mit den Schwingungen anderer Moleküle nicht an einer Wellenlänge festgemacht werden konnte. **Bild 1.15** zeigt eine hervorragende Übereinstimmung der normgerecht mit einem CFR-Motor gemessenen Oktanzahlen mit den spektroskopisch gemessenen.

So konnte mit wenigen Millilitern innerhalb einiger Sekunden präzise eine Oktanzahl bestimmt werden. Mit der vorliegenden Methode war es fortan möglich, den Einfluss verschiedener Parameter auf die MOZ sowie ROZ zu untersuchen. Besonders die Temperatur und das damit verbundene Regime, in dem die Reaktion abläuft, erwies sich als entscheidend. **Bild 1.16** zeigt exemplarisch den Einfluss der Temperatur auf sowohl die ROZ als auch die MOZ beim *Hydroprocessing* des Schwerbenzins.

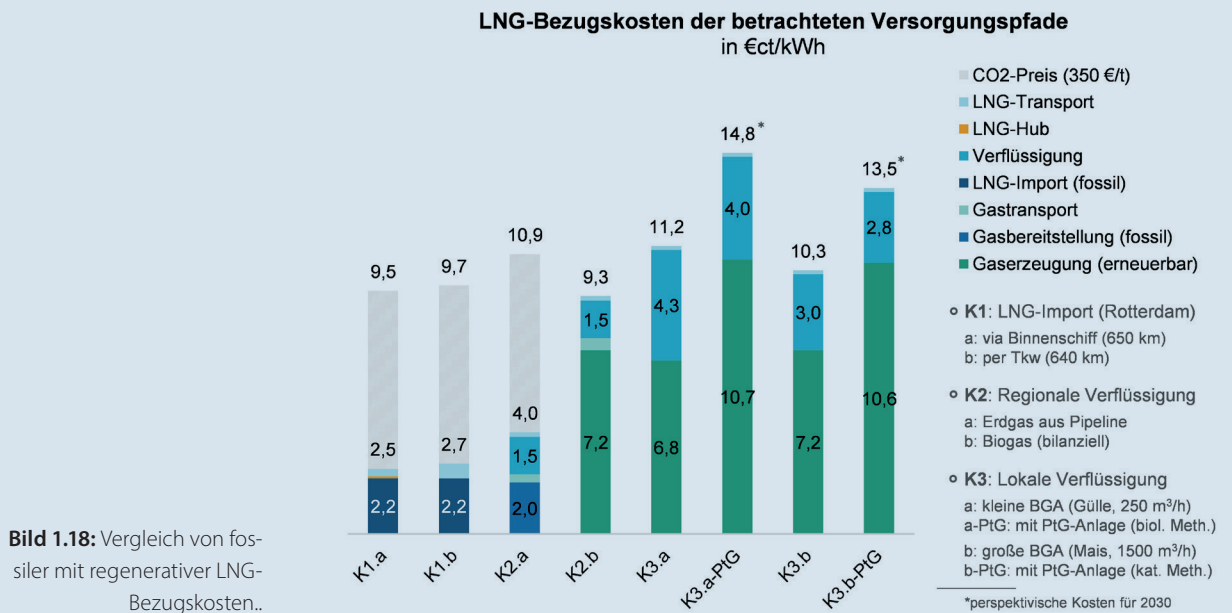
Es zeigt sich eine sehr gute Korrelation zwischen den Oktanzahlen und der Paraffinselektivität, wobei die ROZ am deutlichsten von dieser profitiert (Vergleich Steigung). Bemerkenswert ist der Umstand, dass die MOZ im untersuchten Bereich über der ROZ liegt, für Standardbenzine liegt der umgekehrte Fall vor. Es kann argumentiert werden, dass die ROZ deutlich stärker von hoch isomerisierten und damit thermisch stabileren Molekülstrukturen profitiert.

Mit dieser spektroskopischen Methode wurde untersucht, wie sich die Qualitäten der Kraftstoffe bei einer Vielzahl von Parametern verändern. Neben der Oktanzahl

wurde der Leichtsiederanteil als kritische Größe identifiziert. Die DIN EN 228 schreibt hier mit den sogenannten E-Werten Mindestanteile vor, so muss etwa beim E100 (Verdampfter Anteil bei 100 °C) mindestens 46 Vol.-% des Otto-Kraftstoffes verdampft sein. MtG-Kraftstoffe sind meist reich an vergleichsweise schweren Aromaten und liegen für den beispielhaft erwähnten E100 nicht selten unter 10 Vol.-%. Es liegt daher nahe, die Schwerbenzinfraction so aufzubereiten, dass sie möglichst viele Leichtsieder aufweist. Im nachfolgenden **Bild 1.17** ist zu sehen, wie sich die einzelnen E-Werte über die Prozesstemperatur entwickeln.

Es geht hervor, dass eine Erhöhung der Reaktionstemperatur einen positiven Effekt auf den Anteil an Leichtsiedern mit sich bringt. Für *Cracking*-Reaktionen bei mittleren Drücken und verhältnismäßig hohen Temperaturen gilt es aber generell, einen Mittelweg hinsichtlich der gewählten Temperatur zu finden. So fällt auch hier auf, dass eine zu hohe Reaktionstemperatur einen Verlust an Kohlenstoff durch die Bildung niedermolekularer Spaltprodukte bedeutet.

Für den weiteren Verlauf der Arbeit soll der *Cracking*-Mechanismus näher beleuchtet werden. Wie bereits erwähnt ist es wünschenswert, zunächst ein Öffnen der Ringe zu erzielen und die Dealkylierung weitestgehend zu unterdrücken. Dieser Mechanismus ist zu großen Teilen von der Wahl des katalytisch aktiven Metalls abhängig, weshalb dieses weiter in den Fokus gerückt werden soll. Des Weiteren wurden 2020 etwa 60 L Kraftstoff in unterschiedlichen Qualitätsstufen im Labor erzeugt. In naher Zukunft sollen diese näherungsweise aromatenfreien Kraftstoffe auf ihr Verhalten im Motor in Kooperation mit dem Institut für Kolbenmaschinen am KIT untersucht werden. Der Fokus liegt dabei auf der Frage in wie weit es erstrebenswert ist, den Paraffingehalt durch ein selektives Ringöffnen weiter zu erhöhen.



**Bild 1.18:** Vergleich von fossiler mit regenerativer LNG-Bezugskosten..

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

### 1.5 Aus der Tätigkeit des Bereichs Gastechologie der DVGW-Forschungsstelle am EBI, DVGW gt

#### 1.5.1 Arbeitsgruppe „Systeme und Netze“

Wolfgang Köppel, Maximilian Heneka,  
Christian Hotz, Volkan Isik, Jithin Mohan,  
Praseeth Prabhakaran, Johannes Ruf,  
Louis Wayas, Azif Zubair

Die Systemrelevanz von Gas für das Energiesystem Deutschland ist in den letzten Jahren erkannt worden und rückt weiter in den Fokus für eine schnelle und nachhaltige Umsetzung der Energiewende. Die Rolle von gasförmigen chemischen Energieträgern und deren Speicherung, Transport, Verteilung und Verwendung wird in der Arbeitsgruppe „Systeme und Netze“ ganzheitlich anhand von technischen, ökonomischen und ökologischen Analysen untersucht. Beispielhaft werden im Folgenden zwei kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben vorgestellt.

Im DVGW-Forschungsvorhaben „LNG-Nutzungs- und Bereitstellungskonzepte für Süddeutschland am Beispiel Baden-Württembergs“ wurde unter Einbindung von regionalen Energieversorgern und Stadtwerken die LNG-Versorgung von Süddeutschland am Beispiel von Baden-Württemberg untersucht. In diesem Projekt wurden Untersuchungen zum heutigen LNG-Potenzial, zu den Bereitstellungskosten von fossilem und EE-LNG sowie

zum Treibhausgasminderungspotential (THG) im Mobilitätssektor durchgeführt.

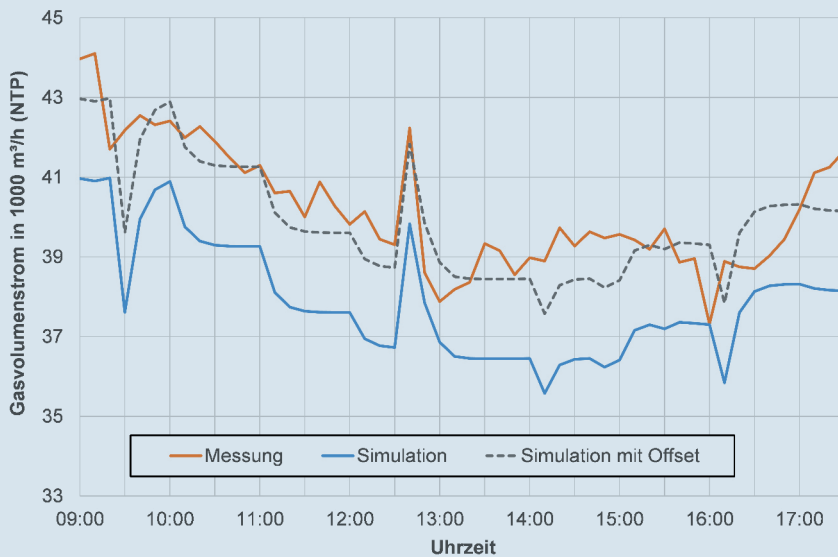
Das heutige LNG-Nutzungspotential in Baden-Württemberg beträgt etwa 18,2 TWh. Dieses Potenzial ergibt sich im Wesentlichen aus dem Kraftstoffwechsel im Schwerlastverkehr von Diesel zu LNG mit ca. 8,3 TWh [4] und durch die Erschließung von Wärmekunden in Gebieten, die bisher nicht an das Gasnetz angeschlossen sind, mit ca. 9 TWh [5]. Schienenverkehr und Binnenschifffahrt weisen zusammen ein weiteres Potenzial von ca. 0,9 TWh aus.

Die Bereitstellungskosten für fossiles und regeneratives/grünes LNG in Baden-Württemberg beinhalten die Kapital- und Betriebskosten [6]. Für eine mögliche Versorgung von Baden-Württemberg wurden verschiedene Optionen evaluiert:

1. LNG-Import über die LNG-Terminals wie z. B. Rotterdam
2. LNG-Verflüssigung in Süddeutschland in größeren Verflüssigungsanlagen
3. LNG-Verflüssigung in Süddeutschland in kleineren Verflüssigungsanlagen

Für den LNG-Import aus Rotterdam wurden aktuelle LNG-Bereitstellungskosten von 2,5 €/ct/kWh (K1.a) bzw. 2,7 €/ct/kWh (K1.b) ermittelt (**Bild 1.18**). Im Vergleich zur regionalen Verflüssigung von Pipelinegas in Baden-Württemberg sind die Kosten im Schnitt um 33 % (K2.a) bzw. 72 % (K2.b) niedriger.

In der Diskussion wird die LNG-Nutzung im Schwerlastverkehr als zielführend und schnell umsetzbar angesehen, so dass sie in diesem Projekt als Anwendungsbeispiel



**Bild 1.19:** Summe der Gasflüsse an den Übernahmestationen; Mess- und Simulationswerte.

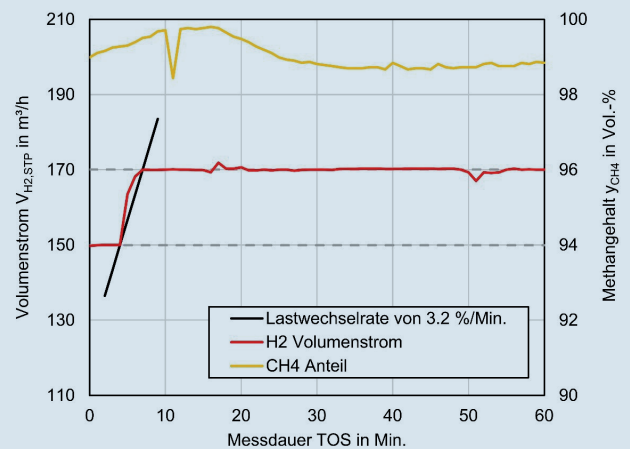
spiel aufgegriffen wurde. Diese Einschätzung spiegelt sich am Ende des Projekts in der Realität wider. Wie aus aktuellen Zahlen der LNG-Taskforce hervorgeht, wurden seit Inkrafttreten des BMVI-Förderprogramms am 22. Mai 2018 insgesamt 3.996 Förderanträge für LNG-Nutzfahrzeuge gestellt (Stand: Dezember 2020, [7]). Auch die Zahl der LNG-Tankstellen ist stark gewachsen. Demnach hat sich allein im Jahr 2020 die Zahl der öffentlich zugänglichen LNG-Tankstellen von 11 auf 42 mehr als verdreifacht. Aktuell (Stand: Dezember 2020, [8]) befinden sich 45 weitere Tankstellenprojekte in der Planung. Daher wird die ökologische Betrachtung der Gesamtprozesskette immer wichtiger, um Effekte zeitlich und quantitativ einzuordnen. Hierfür wird die Well-to-Wheel-Analyse vorgeschlagen. Die Well-to-Wheel-Analyse ist eine Methode zum Vergleich von THG-Minderungspotenzialen, indem die Primärenergieverbräuche erfasst und die Treibhauseffekte ausgewiesen werden. Im Gegensatz zu einer vollständigen Ökobilanz werden Bauvorleistungen wie z. B. Betonherstellung sowie Wartungs- und Entsorgungsprozesse nicht betrachtet. Somit erstreckt sich der Bilanzraum von der Rohstoffquelle des Kraftstoffs über die Umwandlung des Rohstoffs in Kraftstoff bis hin zur Umwandlung der chemischen Energie im Kraftstoff zur kinetischen Energie beim Fahren.

In diesem Projekt wurden die verfügbaren Kraftstoffe für das Beispiel Sattelzugmaschine fossiles LNG, Biogas aus Mais und Biogas aus Gülle mit Diesel verglichen. Die THG-Emission von fossilem LNG liegt zwischen 9 und 12 % geringer als die von Diesel, das ca. 970 g CO<sub>2</sub>-eq/km verursacht. Biogas aus Mais vermeidet ca. 48 % gegenüber Diesel und weist somit schon eine deutlich bessere THG-

Emissionsbilanz auf. Bei der Nutzung von Methan aus Gülle als Kraftstoff wird eine negative THG-Emission (THG-Senke) von 600 - 930 g CO<sub>2</sub>-eq/km erreicht. Dies ist auf die Vergleichsanwendung zurückzuführen. Gülle wird üblicherweise als Wirtschaftsdünger auf die Felder ausgebracht. Durch natürliche Abbauprozesse entstehen dann auf dem Feld klimawirksame Gase wie Lachgas und Methan, die bei einer Weiterbehandlung in einer Biogasanlage nicht entstehen bzw. gezielt aufgefangen und genutzt werden. Somit kann mit Biogas und insbesondere mit Biogas aus Gülle eine schnelle und nachhaltige THG-Emissions-Minderung erzielt werden.

Das Leuchtturmprojekt „Power-to-Gas“, gefördert vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, beschäftigte sich mit der Erzeugung von Wasserstoff an einem Wasserkraftwerk in Whylen nahe Basel. Die zentrale Fragestellung bei einem Laufwasserkraftwerk ist die Nutzung von Strom, der bei hohem EE-Strom-Angebot nur sehr niedrige Preise erzielt. Daher war das Ziel des Projektes, die Elektrolysetechnologie technisch so weiterzuentwickeln, dass die Gestehungskosten für Wasserstoff deutlich gesenkt werden können. Hierfür wurde eine Testumgebung am Standort Whylen geschaffen, um neuartige Elektrolysemodule im realen Betrieb testen zu können. Zusätzlich wurde an diesem Standort ein konventioneller Elektrolyseur mit einer elektrischen Leistung von 1 MW für eine Langzeitdemonstration installiert. Diese Konfiguration lieferte die Primärdaten für die Kostenrechnung, die durch die DVGW-Forschungsstelle mit den Partnern durchgeführt wurde. Für die Variationen wurden Stromzeitreihen, Wasserstoffherstellungsverfahren, Zielprodukt, Distributionswege und weitere

**Bild 1.20:** Auswertung des dynamischen Betriebs der Demonstrationsanlage in Falkenhagen. Lastwechsel von 71 % auf 81 % mit einer Lastwechselrate von 3.2 %/min.



Erlösoptionen als vergleichend mitbetrachtet. Bei einer Laufzeit von 20 Jahren wurde für die Konstellation Gesteuungskosten von 4,6 €/kg ermittelt.

Zum anderen sollte die schwankende Eispeisung von Wasserstoff in ein bestehendes Gasnetz mit der Fragestellung der Voraussage der Ausbreitung im Gasnetz anhand einer Fallstudie untersucht werden. Hierfür wurde das Gasnetz hydraulisch mit der kommerziellen Software STANET® simuliert. Zur Validierung der berechneten zeitlichen und örtlichen Wasserstoff-Gehalte wurde die H<sub>2</sub>-Einspeisung mit einer Stoßodorierung simuliert. Hierbei wird am Einspeisepunkt die Odoriermittelkonzentration deutlich erhöht und stromabwärts wird die Änderung der Odoriermittel messtechnisch erfasst. Da solch ein Test vor Ort in Whylen nicht möglich war, wurde dieser mit den Stadtwerken Karlsruhe Netzservice GmbH unter dem Dach der Forschungspartnerschaft Energie Karlsruhe durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Simulation die Realität in ausreichender Genauigkeit abbildet. Lediglich eine Anpassung (Offset) war nötig, um die realen Verbräuche an die auf Basis von Standardlastprofilen simulierten Werte anzupassen (Bild 1.19). Mit diesem Test konnte daher festgestellt werden, dass die Methodik für die Erfassung von Netzzuständen verwendbar ist und auch für die Betriebsführung prädiktiv eingesetzt werden kann. Zudem zeigte der Test, dass Eingriffe in die Netzbetriebsführung wie z. B. eine flexible Wasserstoffeinspeisung ohne eine Simulation einen hohen Messaufwand im Netz und somit zu erhöhten Kosten führen würde.

Literatur

[4] Stand heute; zukünftig ist entsprechend dem steigenden Schwerlastverkehr mit einem leicht steigenden Potential zu rechnen

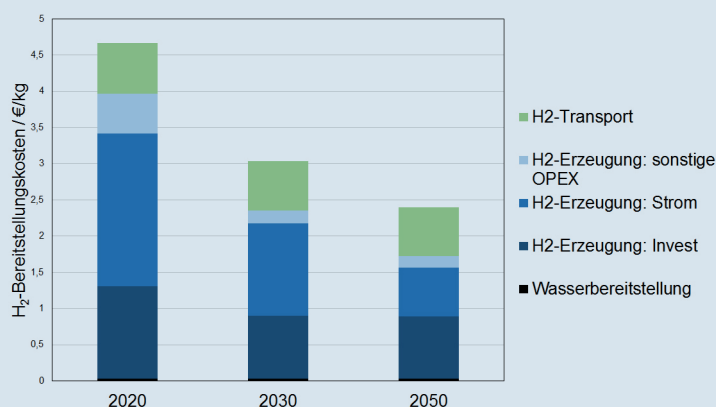
[5] Stand heute; zukünftig ist u.a. aufgrund von Gebäudesanierungen von sinkenden Verbräuchen in der Wärmeversorgung auszugehen  
 [6] Betriebskosten beinhalten u. a. Wartung, Instandsetzung, Personal, Energie, Einsatzstoffe, Gas/LNG-Bezug, Logistik  
 [7] Gröblichhoff, S. (2020): LNG als Treibstoff. Webinar „LNG als Treibstoff“ 3.12.2020 veranstaltet von Zukunft Erdgas e.V.  
 [8] Dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (Zugriff am: 18. Dezember 2020): Öffentliche LNG-Tankstellen in Deutschland. [Online] Verfügbar unter: <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/lng-taskforce-und-initiative-erdgas-mobilitaet/>.

1.5.2 Arbeitsgruppe „DVGW Verfahrenstechnik“  
 Frank Graf, Katharina Bär, Johanna Gegenheimer, Peter Kussin, Janina Leiblein, Friedemann Mörs, Christian Müller, Ruth Schlautmann

Die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik (AG-VT) beschäftigt sich mit der Erzeugung, Aufbereitung und Umwandlung von Gasen aus erneuerbaren Quellen. Die Arbeiten umfassen experimentelle und theoretische Untersuchungen zu den Themengebieten biologische bzw. thermochemische Gaserzeugung, Gasreinigung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung sowie biologische bzw. katalytische Methanisierung.

Im Februar 2020 wurde das EU-Projekt „STORE&GO“ erfolgreich beendet. Im Rahmen einer Abschlusskonferenz an der DVGW-Forschungsstelle am EBI wurden die finalen Projektergebnisse der Öffentlichkeit präsentiert. Ein Schwerpunkt des Projekts war die techno-ökonomische Bewertung der drei PtG-Demonstrationsanlagen mit unterschiedlichen Methanisierungstechnologien:

- Katalytische Wabenmethanisierung
  - Biologische Methanisierung in gerührter Blasensäule
  - Katalytischer mikrostrukturierter Reaktor
- Zur Analyse wurden Versuchsergebnisse der Anlagen hinsichtlich Energieverbrauch, Gasqualität, dynamische



**Bild 1.21:** Bereitstellungskosten von Wasserstoff aus der MENA-Region für heute, 2030 und 2050.

Betriebsweise etc. ausgewertet und in einem zweiten Schritt optimiert. In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass die geforderte Produktgasqualität (Methangehalt) von  $y_{\text{CH}_4} > 95$  Vol.-% in den drei Anlagen erreicht wurde. Des Weiteren wurde der dynamische Betrieb der Methanisierungsanlagen untersucht. Hierfür wurden Lastkurven vorgegeben und die Auswirkungen der Laständerung auf die Produktgasqualität wurden evaluiert. In **Bild 1.20** sind Versuchsergebnisse der Anlage in Falkenhagen (katalytische Wabenmethanisierung) abgebildet. In dem Diagramm sind die Laständerung von 71 % auf 81 % und der Methangehalt im Produktgas dargestellt. Mit den drei Technologien ist eine LCR von min. 5 %/min. bei einem konstant hohen Methangehalt von größer 95 Vol.-% möglich. Neben der technischen Analyse wurden ebenfalls eine ökonomische Bewertung und eine Optimierung der Anlagen durchgeführt. Dazu wurden die Anlagen auf Nennleistungen von 5 MW, 10 MW und 50 MW skaliert und die Investitionskosten bestimmt. Die Kosten für eine 5 MW-Anlage liegen in Abhängigkeit des Reaktorkonzepts zwischen 720 €/kW und 1.090 €/kW. Auf Basis der berechneten Kosten wurden Kostenschätzungen für zukünftige Kosten von Power-to-Gas-Anlagen vom Energieinstitut Linz durchgeführt.

Das DVGW-Leitprojekt „Roadmap Gas 2050“ beinhaltet u. a. die Entwicklung eines Konzepts zur Bereitstellung von klimaneutralen Gasen für die Gasversorgung in Deutschland. Der Fokus der Arbeiten der Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik liegt hierbei in der Ermittlung des Bedarfs von EE-Gasen und der Entwicklung konkreter Verfahrens- und Logistikketten zur Bereitstellung der Gase. Hierfür werden Logistikketten für die inländische und ausländische Produktion und den Import von EE-Gasen techno-ökonomisch bewertet. Die EE-Gase sind Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen und Methan, welches aus Fermentation oder Vergasung von Biomasse und durch

katalytische Methanisierung gewonnen wird. In einem Übersichtskatalog werden konventionelle und alternative Wasserstoff-Herstellungsverfahren in Form von Steckbriefen vorgestellt. Die Steckbriefe enthalten die wichtigsten Parameter jedes Verfahrens wie z. B. Reaktionsbedingungen, Reaktortechnik, Reinheitsgrad der Gase sowie Angaben zum Technologiereifegrad. Aufgrund des sehr hohen Technologiereifegrads wurden die Wasserelektrolyse sowie die Dampfreformierung mit CCS im Rahmen des Projekts im Detail betrachtet. Zusätzlich wurde die Methanpyrolyse technoökonomisch bewertet. Schwerpunkt der Arbeiten war die detaillierte Analyse der Wasserstoffherstellung in MENA per Elektrolyse und der Pipeline-Transport nach Deutschland. Bestandteile der gesamten Prozesskette sind die Photovoltaikanlagen zur Strombereitstellung, eine Meerwasserentsalzung, eine Elektrolyse und der Transport des Wasserstoffs nach Deutschland. Die erfolgte technische Auslegung aller Komponenten liefert die Grundlage für die Kostenabschätzung. Die Ergebnisse der Kostenabschätzung sind in **Bild 1.21** zu sehen. Durch das Kostensenkungspotenzial der Investitionen für Elektrolyseure und der Strombereitstellung können die heutigen Kosten von 4,7 €/kg um ca. die Hälfte auf 2,4 €/kg im Jahr 2050 gesenkt werden.

### 1.5.3 Arbeitsgruppe „Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung“

Die Gasaufbereitung mit ionischen Flüssigkeiten (IL) zur Abtrennung von  $\text{CO}_2$  aus Gasströmen wurde in 2020 weiter beforscht und für verschiedene Anwendungsbereiche adaptiert. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist in Kapitel 1.4.3 (Arbeitsgruppe „Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung“) zu finden. Die  $\text{CO}_2$ -Abtrennung mit ionischen Flüssigkeiten, das ur-

sprünglich für die absorptive CO<sub>2</sub>-Entfernung aus Biogas entwickelt wurde, wird im EU-Projekt „ReCO2De“ (<https://www.recodeh2020.eu>) für die CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus industriellen Abgasströmen genutzt. Hierzu wurden vom Projektpartner IoLiTec eine umfangreiche Auswahl an potenziellen IL synthetisiert und am EBI im Labormaßstab charakterisiert und bewertet. Aussichtsreiche Flüssigkeiten wurden daraufhin in einer Technikumsanlage auf die Eignung für den Prozess untersucht und die Betriebsführung optimiert. Es wurde eine geeignete Flüssigkeit gefunden, welche sowohl eine hohe CO<sub>2</sub>-Kapazität als auch eine hohe Stabilität gegenüber Sauerstoff aus dem Rauchgas aufweist. Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse erfolgte ein Upscaling des Prozesses. In dem mit 8 Mio.€ geförderten Demonstrationsvorhaben wird die Pilotanlage an einem Zementwerk in Griechenland für die Aufbereitung von 50 m<sup>3</sup>/h Abgas betrieben und das abgetrennte CO<sub>2</sub> für die Synthese verschiedener Zement-Additive genutzt. In 2020 startete die Fertigung der TRL 6-Demonstrationsanlage beim italienischen Projektpartner Hysytech (Anlagenbauer).

In dem vom BMWi geförderten Leitprojekt „MethQuest“ ([www.methquest.de](http://www.methquest.de)) wird die Eignung des Verfahrens zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung mit ionischen Flüssigkeiten für die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung aus Umgebungsluft (engl.: Direct Air Capture, DAC) untersucht. Dabei liegt die Herausforderung der Trennaufgabe in dem geringen CO<sub>2</sub>-Anteil in der Luft von ca. 400 ppmv. Für die experimentellen Arbeiten wurde die bestehende Technikumsanlage für einen Luftdurchsatz von 20 m<sup>3</sup>/h erweitert. In ersten Versuchen konnte die Machbarkeit nachgewiesen und konzentriertes CO<sub>2</sub>-Desorptionsgas mit 70 - 90 % CO<sub>2</sub> gewonnen werden. Neben CO<sub>2</sub> wird auch Wasser aus der Luft im ionischen Fluid (Waschflüssigkeit) akkumuliert und während der Desorption wieder freigesetzt. Für eine optimale Nutzung der Ressourcen bei der Erzeugung erneuerbaren Methans ist es nicht ausreichend, die einzelnen PtG-Technologien (CO<sub>2</sub>-Bereitstellung, Methanisierung und Elektrolyse) separat zu betrachten. Erst die Bewertung einer gesamten PtG-Prozesskette berücksichtigt Wechselwirkungen wie Wärmeintegration zwischen den einzelnen Technologien. Deshalb sind die Arbeiten zur technischen und ökonomischen Bewertung verschiedener PtG-Prozessketten im Projekt „MethQuest“ essenziell.

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „ProBioLNG“ ([www.probiolng.de](http://www.probiolng.de)) arbeiten seit September 2019 fünf Partner aus Wissenschaft und Industrie an der Demonstration einer neuartigen Prozesskette zur Bereitstellung von LNG aus erneuerbaren Quellen. Die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut und die Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim haben gemeinsam ein Verfahren entwickelt, um Biogas mit

einem Methananteil von mehr als 75 Vol.-% zu produzieren. Dies gelingt, indem die eingesetzte Biomasse zunächst bei Umgebungsdruck in einem kontinuierlich betriebenen Hydrolysereaktor (HR) in gelöste organische Verbindungen überführt wird. Diese werden im zweiten Schritt, dem so genannten Druckmethanreaktor (MR), zu Methan umgewandelt. Um das erzeugte Methan in einem Sterling-Verflüssiger zu verflüssigen, wird zunächst mit Hilfe von ionischen Flüssigkeiten CO<sub>2</sub> aus dem MR-Gas entfernt und in Adsorbentien entschwefelt und getrocknet. In aktuellen Arbeiten der DVGW-Forschungsstellen wurde die Detailplanung der Gasausbereitung und der Verschaltung der Gesamtprozesskette aus Biogasproduktion, Gasaufbereitung und Verflüssigung durchgeführt.

#### 1.5.4 Arbeitsgruppe „Materialprüfung“

Andreas Strauß, Jörg Riedl

Im akkreditierten Materialprüflabor werden Baumuster- und Kontrollprüfungen insbesondere für Dichtungsmaterialien, Korrosionsschutzmaterialien und Hilfsstoffe, wie Dichtstoffe, Schmierstoffe, Lecksucher oder Odoriermittel, durchgeführt. Auftraggeber sind weltweit ansässige Kunden.

Trotz Einschränkungen infolge der Corona-Pandemie lag das Prüfaufkommen auch 2020 auf einer soliden Basis. Die Vor-Ort-Probennahme für Kontrollprüfungen und Präsenz-QS-Audits wurden durch DVGW CERT ausgesetzt, so dass Proben zugeschickt werden konnten. QS-Audits wurden verschoben oder als Remote-Audit durchgeführt. Als Bestandteil des Remote-Audits wurden ergänzend zur Dokumentenprüfung zusätzlich Laborprüfungen einzelner Materialien aufgenommen.

Neben dem herkömmlichen Prüfgeschäft wurde 2020 begonnen, Bewertungskriterien und Prüfungsmethoden für Materialien zu entwickeln, die in Kontakt mit Wasserstoff kommen. In diesem Zusammenhang werden in Zusammenarbeit mit der DVGW CERT GmbH und weiteren Prüfstellen Zertifizierungsprogramme entwickelt. Die Zertifizierungsprogramme sollen als Basis einer Wasserstoffzertifizierung dienen und solange angewandt werden, bis die allgemeine Regelsetzung das Thema aufgegriffen und verankert hat. Für die Materialprüfung liegt der Fokus auf den Zertifizierungsprogrammen für Elastomere, Flachdichtungswerkstoffe und Schmierstoffe. Zur Durchführung der Prüfungen werden zeitnah Prüfeinrichtungen mit dem Fokus Wasserstoff erweitert bzw. angeschafft.

Im Rahmen der Regelwerksarbeit stand die Überarbeitung von national und international geltenden Normen im Vordergrund. Die Gremien- und Regelwerksarbeit wurde in virtuellen Sitzungen weitergeführt:

- **DIN 30654** „Dichtungsprofile aus expandiertem PTFE für Flanschverbindungen der Gasversorgung“, Über-





**Bild 1.22:** Brennstofflabor, DVGW-Forschungsstelle (Foto: Matthias Bitsch).

führung aus DVGW VP 403 - neue Norm veröffentlicht 2020-01

- **DIN 3535-5** „Dichtungen für die Gasversorgung; Dichtungswerkstoffe aus Gummi, Kork und synthetischen Fasern für Gasarmaturen und Gasgeräte; Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung“ - neue Norm veröffentlicht 2020-07
- **DIN EN 751-3** „Dichtmittel für metallene Gewindeverbindungen in Kontakt mit Gasen der 1., 2. und 3. Familie und Heißwasser - Teil 3: Ungesinterte PTFE-Bänder“ - in Überarbeitung, Entwurf veröffentlicht 2021-01

#### 1.5.5 Arbeitsgruppe „Brennstofflabor“

Jochen Schütz, Kerstin Kröger

Wegen Einschränkungen durch die Covid-19-Pandemie wurden in der ersten Hälfte des Jahres 2020 hauptsächlich bestehende Messmethoden überarbeitet, optimiert bzw. neu entwickelt. Nachdem wieder die Möglichkeit zur Probenahme und für Außendiensttätigkeiten bestand, wurden zuvor vertagte Messtätigkeiten und Prüfaufträge unter Berücksichtigung geltender Verordnungen wieder aufgenommen und systematisch abgearbeitet. Hierzu zählten u.a. umfangreiche Beprobungen diverser Biogasanlagen, wobei der Fokus auf der Biogaserzeugung, Gasaufbereitung und Kontrolle der Einspeisefähigkeit des bereitgestellten Biomethans lag. Zusätzlich zur routinemäßigen Auftragsanalytik beschäftigte sich die Arbeitsgruppe mit einer Vielzahl an analysetechnischen Fragestellungen im Zuge der laufenden Forschungsprojekte. Hierbei wurden z. B. Substanzen

zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung für die Projekte „Recode“, „Pro-BioLNG“ und „MethQuest“ untersucht. Für das Projekt „reFuels“ wurden verschiedene Edukte und Produkte für die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe analysiert.

Das durch Politik, Forschung und Wirtschaft bekundete, stetig steigende Interesse an Wasserstoff als Energieträger und dessen zukünftige Anwendungsmöglichkeiten hielt auch in der Arbeitsgruppe Brennstofflabor Einzug. Hierzu wurden bestehende Messmethoden auf die Anwendbarkeit zur Wasserstoffcharakterisierung überprüft, erste Anpassungen vorgenommen bzw. damit begonnen, neue Methoden zu entwickeln. Ebenso bearbeitet die Arbeitsgruppe das laufende DVGW-Forschungsprojekt „H<sub>2</sub>-Qual – Voruntersuchungen zu Gasbeschaffenheitsaspekten bei Transport und Verteilung von Wasserstoff mit Hilfe der bestehenden Erdgasinfrastruktur“ und hat dessen Projektleitung inne. **Bild 1.22** zeigt einen Blick in einen Teil der Laborräumlichkeiten mit der darin aufgebauten Analytik und Infrastruktur.

Im Jahr 2020 wurde darüber hinaus die DVGW-Studie „Schwefel in der Erdgasinfrastruktur und Erdgasanwendungen“ abgeschlossen, die unter der Beteiligung der DVGW-Forschungsstelle und der Arbeitsgruppe Brennstofflabor erstellt wurde. Neben den bereits erwähnten Forschungsprojekten, beteiligt sich die Arbeitsgruppe Brennstofflabor an weiteren, aktuell andauernden Projekten. Zur Beurteilung neuer Messmethoden und -geräten zur Leckagedetektion an Gasverteilnetzen wurde das DVGW-Forschungsprojekt „EvaNeMeL – Evaluierung neuartiger Messmethoden zur Leitungsüberprüfung in Gasnetzen“ gemeinsam mit Messgeräteherstellern und weiterer Industriepartner, initiiert. Des Weiteren ist die

Arbeitsgruppe an der Bearbeitung des DVGW-Forschungsprojekts „ANNeBEL – Aufbau eines neuronalen Netzwerks (DVGW.net) für die Luftbildauswertung zur autonomen Überwachung von Erdgastransportleitungen“ beteiligt.

## 1.6 Veröffentlichungen

### Zeitschriftenaufsatz

- Bär, K.; Graf, F. (2020): Techno-ökonomische Bewertung der Kopplung von Biogasanlagen mit biologischer Methanisierung. *gwf Gas + Energie* (9), S. 48–57.
- Benedetti, V.; Ail, S. S.; Patuzzi, F.; Cristofori, D.; Rauch, R.; Baratieri, M. (2020): Investigating the feasibility of valorizing residual char from biomass gasification as catalyst support in Fischer-Tropsch synthesis. *Renewable Energy* 147, S. 884–894. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.050.
- Chaussonnet, G.; Joshi, S.; Wachter, S. Koch, R.; Jakobs, T.; Kolb, T.; Bauer, H.-J. (2020): Air-assisted atomization at constant mass and momentum flow rate. Investigation into the ambient pressure influence with the smoothed particle hydrodynamics method. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 142 (3), S. 176. DOI: 10.1115/1.4044968.
- Eberhard, M.; Santo, U.; Michelfelder, B.; Günther, A.; Weigand, P.; Matthes, J. et al. (2020): The bioliq® entrained-flow gasifier – A model for the German Energiewende. *ChemBioEng Reviews* 60 (5), S. 56. DOI: 10.1002/cben.202000006.
- Graf, F. (2020): Klimaneutrale Gase sind der Schlüssel zur Energiewende mit Gas! Editorial. *energie | wasser-praxis* (6/7), S. 3.
- Graf, F.; Köppel, W.; Bär, K.; Hüttenrauch, J.; Burmeister, F.; Schwarz, S.; Rommelfanger, J. (2020): Die Rolle von Gas bei der Energiewende – Vorstellung des DVGW-Leitprojekts „Roadmap Gas 2050“. *energie | wasser-praxis* (11), S. 38–43.
- Graf, F.; Sauerschell, S.; Prabhakaran, P.; Bajohr, S.; Slama, J.; Stapf, D.; Kolb, T. (2020): Sektorenkopplung mit Gas im Rahmen des BMBF-Vorhabens SEKO – Teil 2: Gasfachliche Untersuchungen. *energie | wasser-praxis* (10), S. 43–49.
- Gruber, H.; Lindner, L.; Arlt, S.; Reichhold, A.; Rauch, R.; Weber, G.; Trimbach, J.; Hofbauer, H. (2020): A novel production route and process optimization of biomass-derived paraffin wax for pharmaceutical application. *Journal of Cleaner Production* 275, S. 124135. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124135.
- Held, M.; Schollenberger, D.; Sauerschell, S.; Bajohr, S.; Kolb, T. (2020): Power-to-Gas: CO<sub>2</sub> Methanation concepts for SNG production at the Engler-Bunte-Institut. *Chemie Ingenieur Technik* 92 (5), S. 595–602. DOI: 10.1002/cite.201900181.
- Heneka, M.; Köppel, W.; Graf, F. (2020): Vergleichende Bewertung von Power-to-X-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen. *energie | wasser-praxis* (3), S. 40.
- Hongrapipat, J.; Siritwongrunson, V.; Messner, M.; Henrich, C.; Gunnarsen, S.; Koch, M. et al. (2020): Co-gasification of cassava rhizome and woody biomass in the 1 MW el prototype dual fluidised bed gasifier by gussing renewable energy. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 495, S. 12019. DOI: 10.1088/1755-1315/495/1/012019.
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J. (2020): Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2019. DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Teil 1. *gwf Gas + Energie* (6).
- Loipersböck, J.; Weber, G.; Rauch, R.; Hofbauer, H. (2020): Developing an adsorption-based gas cleaning system for a dual fluidized bed gasification process. *Biomass Conv. Bioref.* 13, S. 594. DOI: 10.1007/s13399-020-00999-1.
- Lubenu, U.; Kussin, P. (2020): Abtrennung von Wasserstoff aus Wasserstoff-Erdgas-Gemischen. *energie | wasser-praxis* (1), S. 60–66.
- Mielke, K.; Kolb, T.; Müller, M. (2020): Chemical fractionation of inorganic constituents in entrained flow gasification of slurry from straw pyrolysis. *Biomass and Bioenergy* 141, S. 105732. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105732.
- Nestler, F.; Schütze, A. R.; Ouda, M.; Hadrich, M. J.; Schaadt, A.; Bajohr, S.; Kolb, T. (2020): Kinetic modelling of methanol synthesis over commercial catalysts: A critical assessment. *Chemical Engineering Journal*. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124881.
- Rincón Prat, S.; Schneider, C.; Kolb, T. (2020): Determination of active sites during gasification of biomass char with CO<sub>2</sub> using temperature-programmed desorption. Part 2. Influence of ash components. *Fuel* (267), S. 117179. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117179.
- Ruf, J.; Köppel, W.; Graf, F. (2020): Die Power-to-Gas-Technologie in der deutschen Energiewende. Aktueller Stand und Ausblick auf die nächste Dekade. *gwf - Gas+Energie* (9), S. 42–47.
- Russner, N.; Dierickx, S.; Weber, A.; Reimert, R.; Ivers-Tiffée, E. (2020): Multi-physical modelling of planar solid oxide fuel cell stack layers. *Journal of Power Sources*, S. 227552. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227552.
- Sauerschell, S.; Prabhakaran, P.; Graf, F.; Bajohr, S.; Slama, J.; Stapf, D.; Kolb, T. (2020): Sektorenkopplung mit Gas im Rahmen des BMBF-Vorhabens SEKO - Teil 1: Forschungsinfrastruktur EnergyLab 2.0. *energie | wasser-praxis* (9), S. 26–29.
- Schneider, S.; Bajohr, S.; Graf, F.; Kolb, T. (2020): State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *ChemBioEng Reviews* 2 (1), S. 11. DOI: 10.1002/cben.202000014.
- Schneider, C.; Walker, S.; Aekjuthon, P.; Kentaro, U.; Kolb, T. (2021): Effect of Calcium dispersion and graphitization during high-temperature pyrolysis of beech wood char on the gasification rate with CO<sub>2</sub>. *Fuel* (283). DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118826.
- Schneider, S.; Bajohr, S.; Graf, F.; Kolb, T. (2020): Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. *Chemie Ingenieur Technik* 92 (8), S. 1023–1032. DOI: 10.1002/cite.202000021.
- Schulz, H. (2020): Confinements on growth sites of Fischer-Tropsch synthesis, manifesting in hydrocarbon-chain branching – Nature of growth site and growth-reaction. *Applied Catalysis A: General* 602, S. 117695. DOI: 10.1016/j.apcata.2020.117695.
- Schwarz, S.; Bartsch, V.; Gerstein, D.; Gröschl, F.; Wetzl, U.; Graf, F.; Albus, R.; Burmeister, F.; Lucke, N.; Leicher, J.; Krause, H.; Kukuk, J.S. (2020): Gas. *BWK Band 72* (8-9), S. 94–115.
- Siritwongrunson, V.; Hongrapipat, J.; Kuba, M.; Rauch, R.; Pang, S.; Thaveesri, J. et al. (2020): Influence of bed materials on the performance of the Nong Bua dual fluidized bed gasification power plant in Thailand. *Biomass Conv. Bioref.* 30 (2018), S. 565. DOI: 10.1007/s13399-020-00908-6.
- Verleger, S.; Graf, F.; Gerstein, D. (2020): EU-Leuchtturmprojekt STORE&GO erfolgreich abgeschlossen. *energie | wasser-praxis* (6/7), S. 50–58.
- Wachter, S.; Jakobs, T.; Kolb, T. (2020): Experimental investigation on the influence of system pressure on resulting spray quality and jet breakup applying pressure adapted twin-fluid nozzles. *Inter-*

national Journal of Multiphase Flow 125, S. 103189. DOI: 10.1016/j.jmultiphaseflow.2019.103189.

Wachter, S.; Jakobs, T.; Kolb, T. (2020): Effect of solid particles on droplet size applying the time-shift method for spray investigation. Applied Sciences (10), S. 1–17. DOI: 10.3390/app10217615.

Zhang, F.; Zirwes, T.; Müller, T.; Wachter, S.; Jakobs, T.; Habisreuther, P. et al. (2020): Effect of elevated pressure on air-assisted primary atomization of coaxial liquid jets. Basic research for entrained flow gasification. Renewable and Sustainable Energy Reviews 134, S. 110411. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110411.

### Vortrag

Gegenheimer, J. (2020): MethQuest - Innovative Power-to-Methane Process Chains. Fuel Science: From Production to Propulsion. Aachen, 23.06.2020.

Nestler, F. (2020): Flexible PtX-Prozesse am Beispiel von Methanol (Experimentelle Validierung eines dynamischen Modells für die Methanolsynthese). ProcessNET - Energieverfahrenstechnik 2020. Dechema. Frankfurt a. M., 04.03.2020.

Schneider, C.; Rincon, S.; Kolb, T. (2020): Biogenic Solid Fuel Conversion under Entrained-Flow Gasification Conditions. POSTER. 3<sup>rd</sup> International Workshop on Oxy-Fuel Combustion. Collaborative Research Center Oxyflame. Montabaur, 04.03.2020.

Köppel, W. (2020): Workshop Wasserstoffmotor, Karlsruhe 21.09.2020.

Jakob, J.; Uhlemeuyer, B.; Koralewicz, M.; Gaszon-Real, J.; Zdrallek, M.; Ruf, J.; Köppel, W.; Bauhaus, B. (2020): Simulation of an integrated planning of power and gas distribution considering power-to-gas and gas-to-power units: CIRED Workshop Berlin 2020.

### Hochschulschrift

Kolb, T. (2020): Klimaneutrales Gas - Das EU-Forschungsprojekt Store&Go erzeugt Brennstoffe aus Sonnen- und Windenergie. Interview. Hg. v. KIT Campusreport (KIT Campusreport). Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000117512>.

Bajohr, S.; Klumpp, M. (2020): Die PtX-Revolution kommt in Containern. IN: Energy Lab 2.0: Speichern und Transportieren – die Power-to-X Technologien. LookKit: Das Magazin für Forschung, Lehre Innovation. Online verfügbar unter <https://www.sek.kit.edu/downloads/lookkit-202002.pdf>.

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

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

### 2.1 Lehre und Forschung

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

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

- In der 2017 von der internationalen Organisation „The Millennium Project“ veröffentlichten Auflistung der 15 globalen Herausforderungen wird die Sicherstellung der Energieversorgung in den kommenden Jahrzehnten und die damit verbundene, zwingend erforderliche, nachhaltige Entwicklung der Menschheit zur Beschränkung des Klimawandels aufgelistet.
- Darin ist das Themenfeld „Sicherung der Energieversorgung“ enthalten und es wird daher auch weiterhin

in vielen Feldern der Forschung und Entwicklung präsent sein. Themen rund um erneuerbare Energien, alternative Kraftstoffe, Speicherung und effiziente Nutzung von Energie spielen ebenso eine entscheidende Rolle wie deren Bereitstellung und Verteilung. Diese ist aufgrund ihrer schwankenden Verfügbarkeit durch schnelle und präzise Steuerung und intelligente Vernetzung zu ermöglichen.

- Der Nachhaltigkeitsaspekt wird durch die Nutzung von alternativen und erneuerbaren Energiequellen in Zukunft verstärkt auch in die Prozesse der Fertigungsindustrie Einzug halten, so dass die spezifischen Auswirkungen deren schwankender Verfügbarkeit bei ihrer Anwendung große Auswirkungen auf die Sicherstellung der Produktqualität haben werden. Im Zusammenhang mit diesen Grundüberlegungen steigen die Anforderungen, die für eine Erhaltung bzw. Steigerung der Qualität von Produkten an die Energieeffizienz im Herstellungsprozess und damit auch an die exakte Steuerbarkeit aller beteiligten Teilprozesse gestellt werden müssen.
- Um eine kontinuierliche Energieversorgung zu gewährleisten, wird also der Fokus auf der gesamten Systemtechnik liegen. Aus diesem Grund können die auf der eingesetzten Systemtechnik basierenden Aufgaben nur in Zusammenarbeit und auf der Grundlage

interdisziplinärer Expertise entwickelt werden. Als Konsequenz daraus gewinnt die interdisziplinäre Verbundforschung, insbesondere mit den Materialwissenschaften immer mehr an Bedeutung.

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

Aufgrund dieser Überlegungen verfolgt das Teilinstitut für Verbrennungstechnik folgende Forschungsschwerpunkte:

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

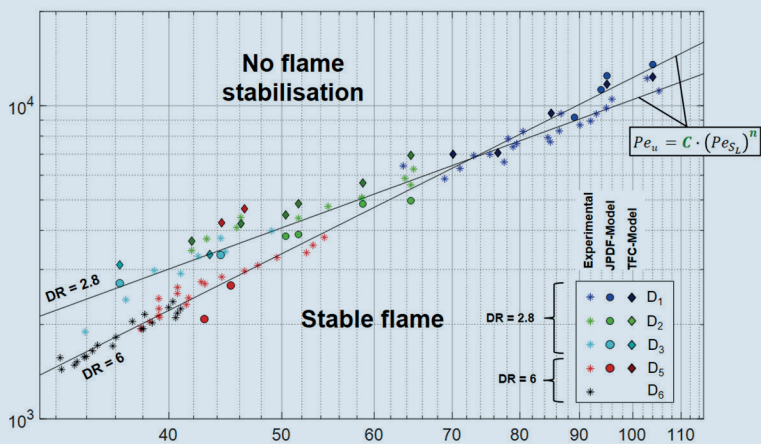
Im Bereich der Lehre wurden überwiegend Veranstaltungen in den klassischen Bereichen der Verbrennungstechnik, aber auch weitergehende Lehrveranstaltungen in Grund- und Vertiefungsfächern der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik (CIW/VT) angeboten. Das Praktikum „Numerik im Ingenieurwesen“ so-

wie die Vorlesungen „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien“, „Messtechnik in der Thermofluidynamik“ und „Energietechnik“ können hier erwähnt werden. Das Angebot an Lehrveranstaltungen konnte trotz der herausfordernden Umstände in Zusammenhang mit der COVID-19 Pandemie durch Online-Vorlesungen oder als Online-Praktikum (z. B. Numerik im Ingenieurwesen) sehr erfolgreich durchgeführt werden. Neben diesen besonders hervorgehobenen Veranstaltungen sind viele Studierende während ihres Studiums auch an den Forschungsaktivitäten des Teilinstituts beteiligt. Trotz der Herausforderungen durch die Pandemie im Jahr 2020 wurden acht Bachelor- und acht Masterarbeiten abgeschlossen.

## 2.2 Laufende Forschungsarbeiten im Bereich Verbrennungstechnik

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

Innerhalb eines vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Kooperationsprojektes, das im Jahr 2021 abgeschlossen werden wird, wurde im Teilprojekt „Modellierung des Verbrennungsverlaufs bei der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen und Flüssigbrennstoff/Wasser-Emulsionen“ die Zielstellung „Betriebsflexibilität und Brennstoffflexibilität“ in Kooperation mit der Siemens AG verfolgt und so die Entwicklung von Verbrennungstechnologien für die klimaschonende Energieumwandlung vorangetrieben. In diesem Vorhaben wurden die für die Beschreibung der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen erforderlichen Teilmodelle zu einem Gesamtmodell zusammengefügt und an einem industrienahen System erprobt. Eine ähnliche Zielstellung verfolgt auch das von der Europäischen Union im Rahmen des „Horizon 2020“

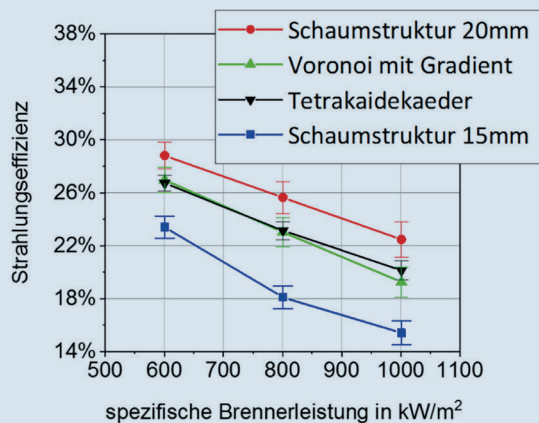
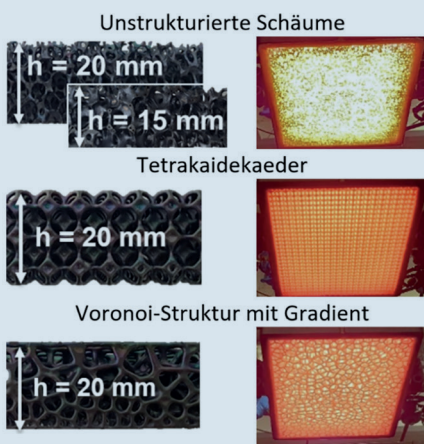


**Bild 2.1:** Vergleich von berechneten und gemessenen mageren Verlöschgrenzen (LBO) für verschiedene Düsengeometrien (D1-D6).

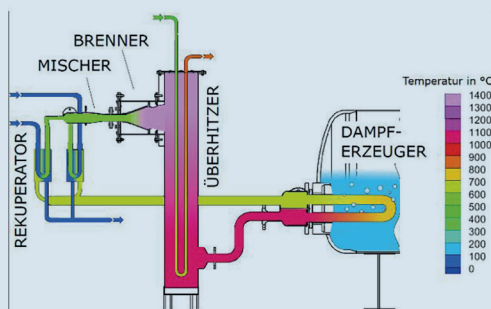
Programms geförderte Verbundprojekt „*Turbomachinery retrofits enabling flexible back-up capacity for the transition of the European energy system*“ (TurboReflex), das ebenfalls in 2021 abgeschlossen werden wird. Für eine Überbrückungszeit zwischen angeforderter Leistung und deren Bereitstellung durch erneuerbare Energiequellen ist die zurzeit bereits installierte Leistung fossil befeuerter Kraftwerke zwar groß genug, jedoch sind die vorhandenen Anlagen in erster Linie nur für die Abdeckung der Grundlast ausgelegt. Eine von dieser Leistungsabnahmeform abweichende Betriebsweise führt zu stark erhöhtem Verschleiß sowie unnötig hohen Emissionen. Im Verbundprojekt TurboReflex wurden daher Technologien zur Aufrüstung bereits installierter Kraftwerke erforscht, die eine flexiblere Betriebsweise ermöglichen. Damit soll erreicht werden, dass eine Betriebsweise mit hohen Lastgradienten nicht zu einer Verschlechterung in Bezug auf Betriebszeit, Kosten und Emissionen führt. Eine entscheidende Hürde für die Ausweitung der möglichen Teillastbedingungen und Leistungsgradienten stellt die emissionskonforme magere Verlöschgrenze („lean blow off“, LBO) dar. Strahlstabilisierte, vorgemischte Flammen bieten in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit, Verbrennungstemperaturen bis zu nur 1000 - 1200 °C zu er-

reichen und so eine Erweiterung des möglichen Teillastbetriebs bei gleichen Emissionen zu erreichen. Am Teilinstitut für Verbrennungstechnik wurde in diesem Rahmen die numerische Vorhersagbarkeit der Verlöschgrenzen mit fortschrittlichen Verbrennungsmodellen untersucht und verbessert. Im Jahr 2020 konnte in dem im Projekt bearbeiteten Arbeitspaket ein Kriterium für die Berechnung der mageren Abblasegrenzen für ein Modellsystem (**Bild 2.1**) definiert werden, das in der Lage ist, Messergebnisse mit guter Genauigkeit wiederzugeben.

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



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



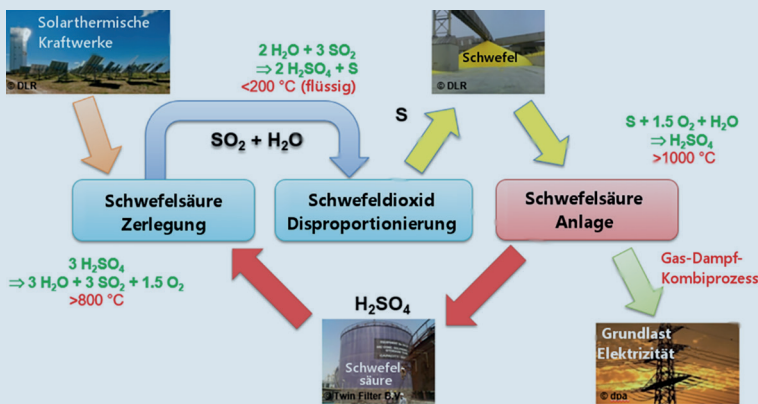
**Bild 2.3:** Links: Maßstabsgetreue Skizze der Brennersektion mit Mischer, Brenner, Überhitzer, Dampferzeuger und Rekuperator. Die Farbe der Ströme repräsentiert die jeweilige Temperatur. Rechts: Brennersektion und Dampferzeuger im Aufbau der Gesamtanlage.

einem Mischmodul, einer Flammensperre und einer porösen, keramischen Struktur. Die laufenden Untersuchungen beziehen sich insbesondere auf die Gestaltung dieser keramischen Struktur. Zur Bewertung verschiedener Strukturen wird unter anderem die Strahlungseffizienz herangezogen, welche das Verhältnis aus Strahlungsleistung und Brennerleistung darstellt. Zur Bestimmung der Strahlungseffizienz des untersuchten Strahlungsbrenners wurde eine genormte Messmethode zur Ermittlung der Strahlungsleistung von Dunkel- und Hellstrahlern (DIN-

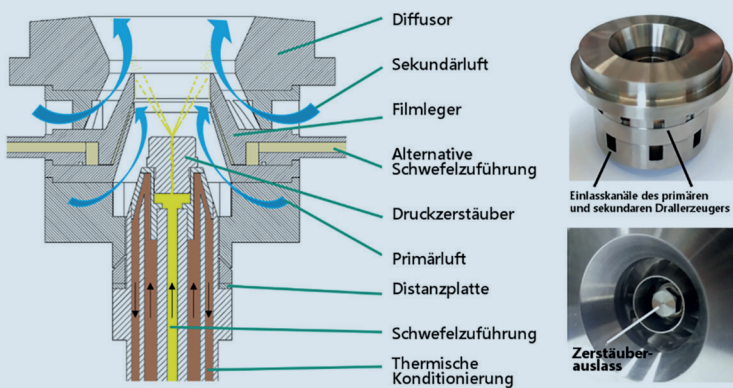
EN 419) adaptiert. Betrachtet wurden die in **Bild 2.2** links dargestellten keramischen Strukturen. Die unstrukturierten Schäume unterscheiden sich in der Höhe (Brenner-einlass bis -auslass) sowie der Herstellungscharge, was zu unterschiedlichen Porendurchmessern führt. Die Tetraikaedekader-Struktur bildet einen periodisch monodispersen Schaum ab und die Voronoi-Struktur ermöglicht die Abbildung einer zufälligen Schaumstruktur und bietet zusätzlich die Möglichkeit die Porengröße in Strömungsrichtung (klein zu groß) zu variieren.

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

Im ebenfalls europäisch geförderten Verbundprojekt „Advanced direct biogas fuel processor for robust and cost-effective decentralised hydrogen production“ (BioRoburPlus) wird Wasserstoff aus entschwefeltem Rohbiogas mittels oxidativer Dampfreformierung produziert. Ziel des Projektes ist die Demonstration des Prozesses mit hohem Wirkungsgrad im technisch relevanten Maßstab von ca. 100 kg Wasserstoff pro Tag. Der hohe Wirkungsgrad wird durch energetische Verwertung eines im Prozess anfallenden Schwachgases erreicht. Der Beitrag des Teilinstituts Verbrennungstechnik zum Projekt ist ein System zur Verbrennung und Prozesswärmebereitstellung, bestehend aus Mischer, Brenner, Überhitzer, Dampferzeuger und Rekuperator (**Bild 2.3**). Der entwickelte Porenbrenner deckt dabei ein weites Leistungsspektrum von 4 - 34 kW ab und kann mit unterschiedlichen Brenngasen betrieben werden: zum einen mit dem im Prozess anfallenden Schwachgas (21 Vol.-% Wasserstoff; Heizwert 2 MJ/kg), zum anderen mit entschwefeltem Rohbiogas (60 Vol.-% Methan; Heizwert 18 MJ/kg), welches dem Prozess als Einsatzstoff dient. Herausforderung dieser Ent-

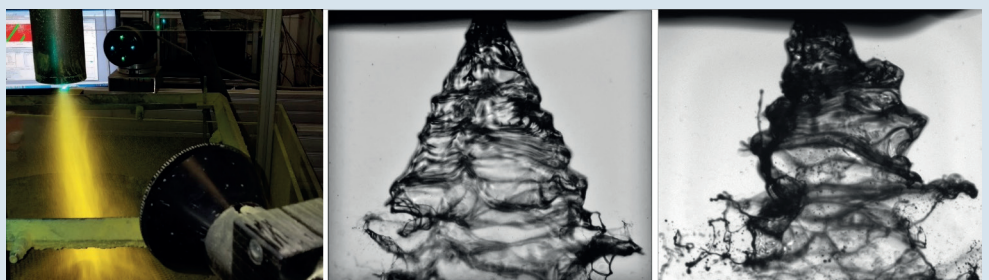


**Bild 2.4:** Schema des schwefelbasierten thermochemischen Kreislaufs zur Speicherung und Nutzung von Sonnenenergie.



**Bild 2.5:** Querschnittsansicht des entwickelten Brenners zum Verbrennen von Schwefel.

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



wicklung war die Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Strukturen bei stark variierenden Heizwerten und hohen Luftvorwärmtemperaturen durch Rekuperation. Die automatisierte Regelung des Brenners kann dabei auch für Gemische beider Gase und bei Schwankungen in der Gaszusammensetzung einen stabilen Brennerbetrieb gewährleisten. Das Brennersystem mit Überhitzer und Rekuperator wurde am Teilinstitut Verbrennungstechnik entwickelt, gebaut und ersten Tests unterzogen. Die Inbetriebnahme der Gesamtanlage findet im Frühjahr 2021 nahe Turin (IT) bei ACEA Pinerolese Industriale S.p.A. statt. In der verbleibenden Projektlaufzeit bis zur Jahresmitte wird in Demonstrationskampagnen Wasserstoff mit einer Reinheit von 99,9 % bei einer Energieeffizienz von 80 % produziert.

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

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

Für die Verbrennung von Schwefel bei hohen Leistungsdichten ist der Zerstäubungsprozess entscheidend. Es wurden bei isothermen Bedingungen (413 K) umfangreiche Zerstäubungsexperimente am Teilinstitut Verbrennungstechnik durchgeführt (siehe **Bild 2.6**). Die Tropfenverteilung wurde mittels Phasen-Doppler-Anemometrie für verschiedene Betriebsbedingungen bestimmt und als Eingangsgröße zu CFD Berechnungen und zur Validierung von Modellen verwendet. Die Erreichbarkeit der hohen Leistungsdichten mit dem entwickelten Brennerkonzept wurde durch hochauflösende numerische Simulationen bestätigt. Im nächsten Schritt wird der Schwefelbrenner am Teilinstitut Verbrennungstechnik getestet.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts CHAIRLIFT (*Compact Helical Arranged combustors with lean LIFTed flames*) wird ein innovatives Brennkammer-

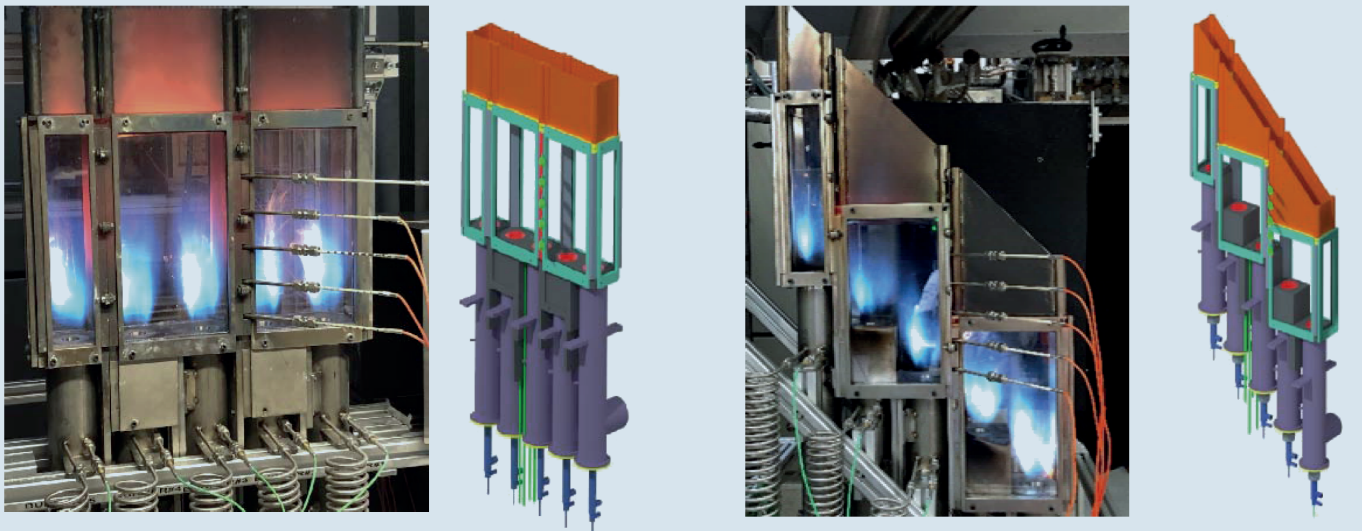
konzept für Flugzeugantriebe entwickelt, welches das Potenzial aufweist, die zukünftigen Emissionsziele gemäß der „Flightpath 2050“ Zielstellung hinsichtlich extrem geringer Stickoxidemissionen zu erreichen.

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

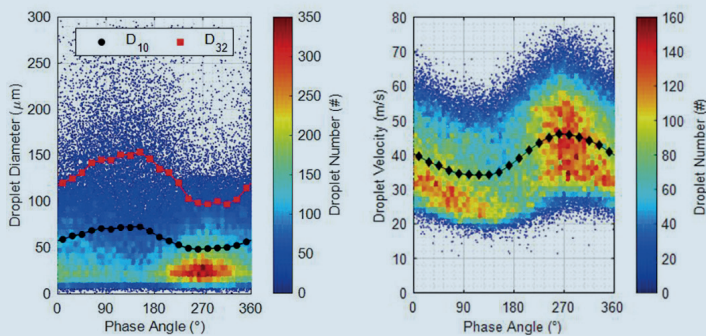
Am Teilinstitut Verbrennungstechnik werden die experimentellen Untersuchungen an einem modularen Multibrennerprüfstand mit verschiedenen Neigungswinkeln der Brenner durchgeführt (**Bild 2.7**). Als Brennstoff wird Kerosin (JET-A1) eingesetzt. Die ersten Ergebnisse hinsichtlich der Flammenstabilität sind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

Im Rahmen des Projekts EU-MAGISTER (*Machine learning for Advanced Gas turbine Injection Systems to Enhance combustor performance*) wird das Auftreten von thermoakustischen Phänomenen in Flugzeugturbinen untersucht. Der Beitrag des Teilinstituts für Verbrennungstechnik ist die Untersuchung der Auswirkung einer pulsierenden Luftströmung auf den Zerstäubungsprozess des Brennstoffes. Hierzu werden grundlagen- und anwendungsorientierte Düsen eingesetzt. Die Luftströmung wird mittels einer Sirene angeregt, um so sowohl Anregungsfrequenz als auch Amplitude zu kontrollieren. Das Spray wird mit der optischen Messmethode „Phasen-Doppler-Anemometrie“ phasenabhängig von der Anregung charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Anregungsfrequenzen unter 400 Hz zu einer starken Schwankung des Sauterdurchmessers führen. Verantwortlich dafür ist die Separierung der Tropfendurchmesser aufgrund der unterschiedlich starken Wirkung der Trägheitskräfte (siehe **Bild 2.8**). Dies führt letztendlich zu einer starken Schwankung der lokalen Luftzahl in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz, was das thermoakustische Phänomen in der Flugzeugturbinen wiederum verstärken kann.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 150 „Turbulente, chemisch reagierende Mehrphasenströmung in Wandnähe“, welcher gemeinsam von der TU Darmstadt und dem KIT durchgeführt wird, wird am Teilinstitut Verbrennungstechnik die Wechselwirkung zwischen Skalartransport und Turbulenz an Wänden experimentell untersucht. Der Versuchsträger besteht dabei aus einer Düse, die mittig mit einer Trennwand versehen ist. Die beiden Teilströme propagieren nach Düsenaustritt in



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



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

einer gewissen Distanz gegen eine zur Strömungsrichtung senkrechte oder geneigte Wand. Die übergeordnete wissenschaftliche Fragestellung der Untersuchungen in der generischen motor- und abgassystemrelevanten Strömungskonfiguration besteht darin, in Wandnähe die Interaktion von Impuls-, Wärme- und Stofftransport bei der Anströmung der gasförmigen Scherschicht zwischen beiden Fluiden zu erforschen. Hierzu werden zum einen zur Bestimmung der Skalar- und Geschwindigkeitsfelder laserdiagnostische Messtechniken, wie die Planare Laserinduzierte Fluoreszenz (PLIF), die Particle Imaging Velocimetry (PIV)/Particle Tracking Velocimetry (PTV) und die (2-Punkt-)Laser-Doppler-Anemometrie (LDA), eingesetzt.

Aus Platzgründen kann hier keine vollständige und detaillierte Übersicht über alle Forschungsarbeiten gege-

ben werden. Hierzu sei auf direkte Kontakte hingewiesen, die sich einfach über die Internetadresse <http://vbt.ebi.kit.edu> herstellen lassen.

### 2.3 Abgeschlossene Promotionen

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

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

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

Dazu wurden Rußeigenschaften in Verbindung mit Temperatur- und OH\*-Chemolumineszenz in einer turbulenten nicht-vorgemischten Erdgas/Ethen Drallflamme gemessen. Als Ergebnis konnten die Eigenschaften des gebildeten Rußes auch unter Variation des Luftverhältnisses, der Drallzahl und den in Betrieb beobachteten thermoakustischen Schwingungen (selbsterregte Verbrennungsinstabilität) bestimmt werden. Für die weitere Analyse der Rußbildung und -oxidation war es zunächst erforderlich, auch die Auswirkung der thermoakustischen



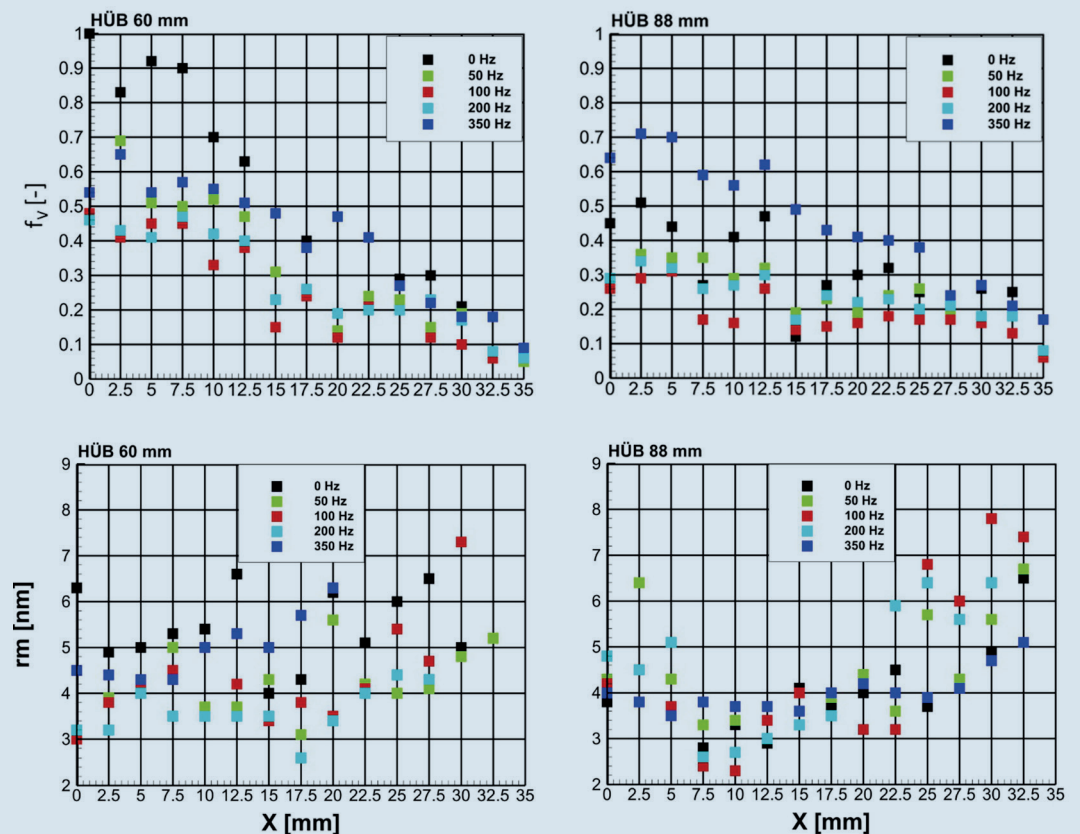
Schwingungen auf die Temperaturverteilung im Brennraum zu klären. Dazu wurde insbesondere auch der Einfluss akustischer Schwingungen auf die Strömung näher untersucht. Die Verteilung der Temperatur und von Rußvorläuferkonzentrationen (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK), sowie der mit OH\*-Chemolumineszenz bestimmte Flammenposition und Wärmefreisetzung unter akustischer Anregung in der Flamme wurde im Anschluss detailliert untersucht. Für die Bestimmung der Rußeigenschaften in einem turbulenten Strömungsfeld, das bei den praxisrelevanten Bedingungen des fett/mager gestuften RQL-Modellbrenners (RQL, „rich burn, quick quench, lean burn“) anzufinden ist, war es erforderlich, die diagnostische Methode der Zwei-Farben-zeitaufgelösten laserinduzierten Inkandescenz (LII) für diese Bedingungen zu erweitern. Nur durch die Anwendung dieser non-intrusiven laseroptischen Methode war es möglich, detaillierte Informationen in der untersuchten, komplexen Strömung zu erhalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der akustischen Anregung der Luftzufuhr die Konzentrationsgradienten reduziert werden, was im Endeffekt eine verbesserte Vermischung von Brennstoff und Luft bewirkt. Daher herrschen in der Brennkammer bei Anregung quasi „vorge-mischte“ Verbrennungsbedingungen vor, und demzufol-

ge wird die Größe lokal brennstoffreicher Zonen stark eingeschränkt. Gleichzeitig können im Fall der Anregung der Strömung (100 Hz) auch nur kleinere Temperaturgradienten beobachtet werden. Gerade solche Bedingungen hemmen aber die Bildung von PAK, was unmittelbar zu einer Inhibierung der Prozesse der Rußbildung und des Rußwachstums führt (**Bild 2.9**).

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen weiterhin eindeutig einen direkten Zusammenhang zwischen der PAK-Konzentration und den Rußeigenschaften in der Flamme. Im Fall der 100-Hz-Anregung der Strömung wird eine Abnahme des Rußvolumenbruchs  $f_v$  um ca. 50 % in allen Bereichen der Brennkammer, unter gleichzeitiger Reduktion des mittleren Rußpartikelradius, festgestellt. Dieses Ergebnis korreliert sehr gut mit der Veränderung der PAK-Konzentration in diesen Zonen: Eine Anregung mit 100 Hz verursacht eine Reduktion der Konzentration aller detektierten PAK (Naphthalin, Acenaphthalin, Indan, Inden, Pyren, Benzo[ghi]fluoranthen, Cyclopenta[cd]pyren) in der Flamme. Unter Berücksichtigung der Existenz von Rezirkulationszonen bedeutet die dabei beobachtete räumliche Verschiebung der Maximalwerte auch eine zeitliche Verschiebung durch ein verzögertes Auftreten der maximalen Spezies-Konzentration. Die akustische Anregung der Strömung und die dadurch verursachten Ver-

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



änderungen in den Bedingungen der Brennkammer führen eindeutig zu einer Hemmung der Bildungsprozesse von PAK. Die Konzentration von Naphthalin wird um 40 %, von Acenaphthalin um 50 %, von Pyren um 60 % und von Cyclopenta[cd]pyren um ca. 30 % reduziert.

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

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

Aufgrund der akustischen Anregung der Luftzufuhr werden die Konzentrationsgradienten reduziert, was in Folge eine verbesserte Vermischung von Brennstoff und Luft bedeutet. Somit herrschen in der Brennkammer in höherem Maße „vorgemischte“ Verbrennungsbedingungen vor, demzufolge die lokalen brennstoffreichen Zonen stark eingeschränkt werden. Gerade solche Bedingungen hemmen die Bildung von PAK (Naphthalin, Acen-

aphthalin, Pyren etc.), was unmittelbar zu einer Abnahme der Rußpartikelbildung und des Rußwachstums führt. Die Vergrößerung der Zone hoher OH\*-Chemolumineszenz weist auf eine Intensivierung der Rußoxidationsprozesse mittels OH-Radikalen hin. Dabei wird die sekundäre Oxidation der bereits entstandenen Rußpartikel von der Vergrößerung der IRZ begünstigt.

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

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

## 2.4 Forschungsstelle für Brandschutztechnik

### IMK-Themen

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

- Nr. 159: Schelb, D.; Jordan, T. „Besonderheiten und Risiken bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen“
- Nr. 204: Augustin, D.; Schöps, F. „Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungsbrand - Teil 2“
- Nr. 205: Max, D. „Anwendungsbereiche und -grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes Teil IV: Ansätze und Bemessungsbrände“
- Nr. 206: Böhler, K.; Dinkov, I. „Ertüchtigung eines kommerziellen Strömungssimulationsprogrammes zum praktikablen Gebrauch bei realen Brandszenarien“
- Nr. 207: Vetter, M.; Schöps, F.; Schelb, D. „Einsatz von Wärmebildkameras zur Ermittlung der Oberflächen-temperaturen von Wohnungstüren bei Bränden“

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

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

### **Laufende Forschungsarbeiten**

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

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

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

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

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

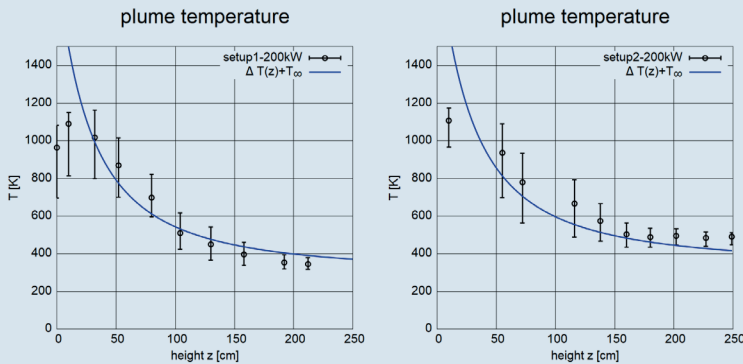
Die Abweichungen der Temperaturen sind im Bereich der Flammenwurzel deutlich erkennbar. Hier liegen die Werte der Empirie erwartungsgemäß deutlich von den gemessenen Temperaturen entfernt. Weiter ist zu erkennen, dass die Schwankungen und damit die Bandbreite der Temperaturen zwischen Minimal- und Maximalwerten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

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

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

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

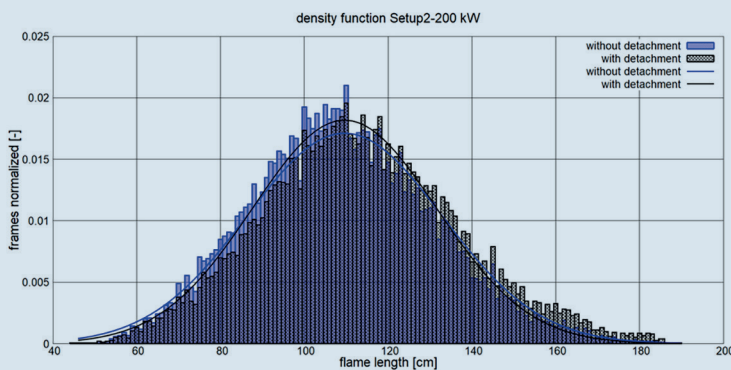
Durch das Werkzeug ist es möglich, Flammenlängen in Brandversuchen anhand von Bildaufnahmen schnell und einfach auszuwerten. Es ist möglich Schwankungsgrößen zu ermitteln, die Einfluss auf weitere Feldgrößen haben. Zwischen freistehenden Flammen und Flammen in Räumen sind Unterschiede sowohl in der Plumetem-



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



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



**Bild 2.12:** Matlab Auswertung für Raumbrand.

peratur wie auch in der Flammenlänge zu beobachten, die weiter untersucht werden.

## 2.5 DVGW-Forschungsstelle und Prüflaboratorium Gas

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

### Prüflaboratorium Gas – Akkreditierung

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

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

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

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

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass es dem Prüflabor möglich ist, die Prüfungen aller Komponenten und Materialien sowie Sicherheitseinrichtungen der Gasversorgung und -nutzung, der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischer Phänomene, sofern anwendbar, im Komplettpaket durchzuführen.

Daneben besteht außerdem die Anerkennung als Prüflabor für DIN CERTCO für Warmluftzeuger, Ölbrenner- und -heizkessel, Temperaturregel- und Begrenzungs-

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

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

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

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

In den Technischen Komitees des CEN (z. B. TC 69, TC 109, TC 234, TC 235, TC 236) wurde damit begonnen, Anforderungen und Prüfmethode zur Wasserstoffeignung der Bauteile und Geräte auszuarbeiten. Der systematische Aufbau der H<sub>2</sub>-Kompetenz im DVGW und damit der nationalen und europäischen Normung soll durch ein Investitionsprogramm aus Forschungsrücklagen und Vereinsmitteln gefördert werden. Die Technischen Komitees sind aufgefordert, hierzu Kernthemen zu benennen, die durch Forschungsvorhaben oder andere Zuarbeiten unterstützt werden sollen. So wurde beispielsweise im TK „Gasarmaturen“ die Neugründung zweier Projektkreise zum Thema H<sub>2</sub>-Readiness für Neu- und Bestandsarmaturen initiiert (tätig seit Februar 2020).

### **Prüflaboratorium Gas – Prüftätigkeiten**

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

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

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

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

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

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

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

Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten bildeten in 2020 weiterhin mehrere Wasserstoffprojekte. Die Forschung lieferte auch die Grundlagen für die Erstellung z. B. des Zertifizierungsprogramms ZP 3100 der DVGW CERT für 20 Vol.-% Wasserstoffbeimischung, welches Ende 2020 ver-

öffentlich wurde. Neben der Fortführung der im Jahr 2019 gestarteten Projekte, z. B. EU-Projekt THyGA (*Testing Hydrogen Admixtures for Gas Applications*), DVGW-Projekt G 201902 „Wasserstoff in der Gasinfrastruktur: DVGW/Avaccon-Pilotvorhaben mit bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff-Einspeisung in Erdgas“ (H<sub>2</sub>-20) und DVGW-Projekt G 201901 „Roadmap Gas 2050“, konnte auch die technisch-wissenschaftliche Begleitung der „Wasserstoff-Insel Öhringen“ der Netze BW eingeworben werden. Bei der „Wasserstoff-Insel Öhringen“ strebt der Netzbetreiber in einem kleinen Inselnetz mit ca. 30 Gasanschlussnehmern die Beimischung bis zu 30 Vol.-% Wasserstoff im Bestand an. Bei der Beimischung von 30 Vol.-% Wasserstoff können energieäquivalent 12 %

CO<sub>2</sub>-Reduktionen gegenüber Methan erzielt werden, bei 20 Vol.-% fällt die Reduktion mit 7,4 % etwas geringer aus.

### Testing Hydrogen Admixture for Gas Applications – THyGA

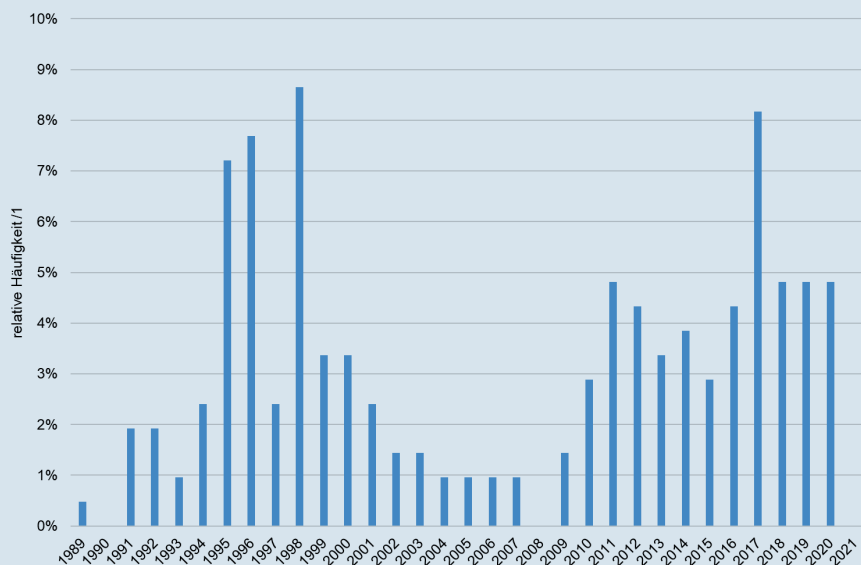
Der Gewerbe- und Wohnungssektor stellt mit ca. 200 Mio. Geräten den größten Erdgasverbrauch in der Europäischen Union dar. In diesen Bereich entfallen damit etwa 40 % des europäischen Gesamtgasverbrauchs [2]. Ein möglicher Ansatz, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren, wäre das Zumischen von Wasserstoff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

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

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



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



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

Die Ergebnisse aus den Messungen der Projektpartner und vom Prüflaboratorium Gas werden im Verlauf dieses Projektes analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse werden genutzt, um Standards für die Prüfung von Feuerungsanlagen bei Erdgas/Wasserstoff Mischungen zu schaffen.

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

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

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

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

Die **Bilder 2.16** und **2.17** verdeutlichen den bereits bekannten Trend bei häuslichen Wärmeerzeugern [5], dass die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen tendenziell durch die Wasserstoffbeimischung abgesenkt werden. Bei Beaufschlagung der Geräte mit G 222 reduzierten sich bei Vollast im Mittel die CO-Emissionen um ca. 35 % und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um ca. 23 % gegenüber den Messungen mit Erdgas. Bei Kleinlast lagen die Reduktionen bei 9 % für CO und ca. 31 % für NO<sub>x</sub>. Die Ergebnisse werden fortlaufend durch das Projektteam auch unter Einbindung der Gerätehersteller analysiert, um das hohe Sicherheitsniveau der Gasverwendung auch bei der Wasserstoffbeimischung beizubehalten. Die bisherigen Ergebnisse sehen sehr vielversprechend aus. Die Erhebungen laufen

auch in 2021 unter Corona-Bedingungen weiter, mit einem Beginn der Einspeisung wird für die Heizsaison 2021/2022 gerechnet.

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

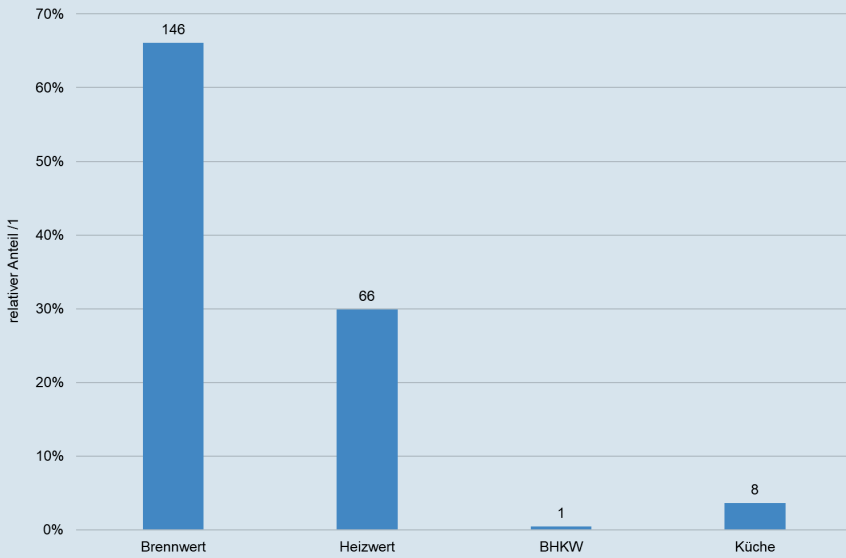
## Literatur

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

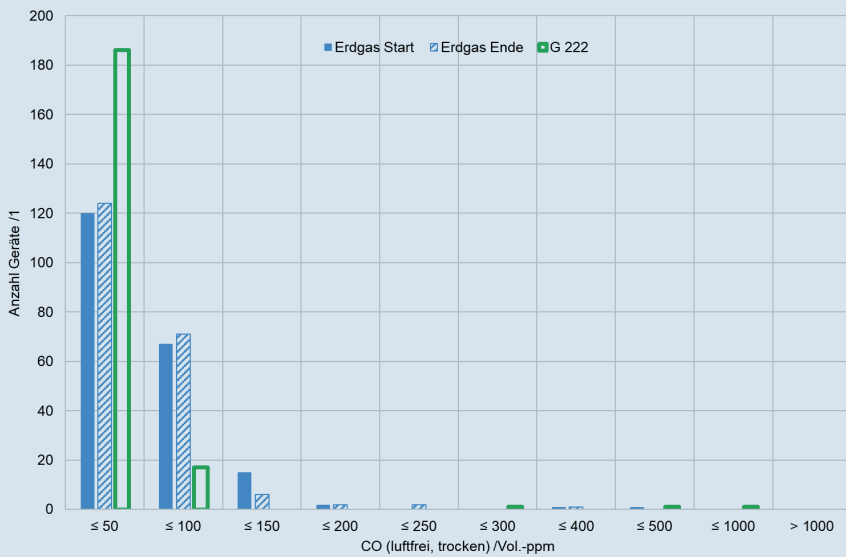
## 2.6 Veröffentlichungen des Teilinstituts Verbrennungstechnik 2020

### Journal- und Buchveröffentlichungen

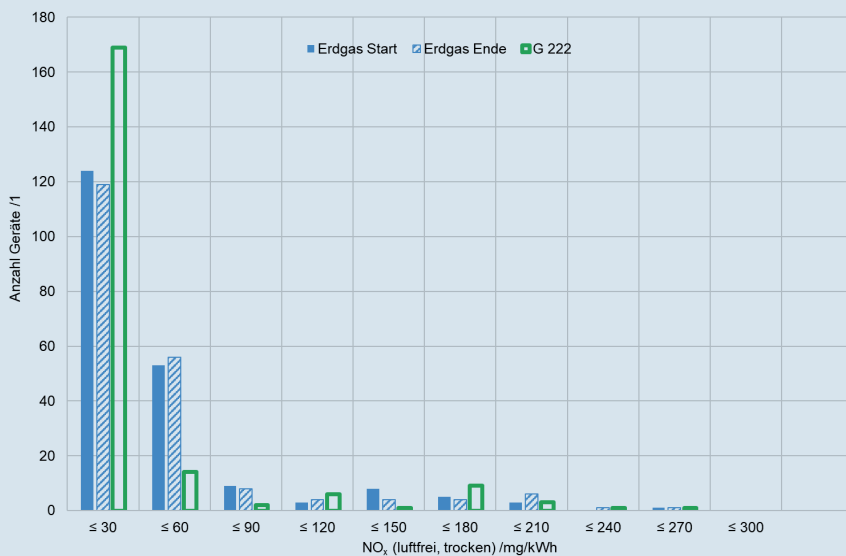
- Augustin, D.; Schoeps, F.*: Brandversuche mit modernem Mobiliar, BRANDSchutz (2020) Nr. 9/2020.
- Brändle, G.; Schönfisch, M.; Schulte, S.*: Estimating long-term global supply costs for lowcarbon hydrogen; EWI Working Paper (2020) Nr. 20/04 ISSN: 1862-3808.
- Flayyih, M.; Schaffert, J.; Burmeister, F.; Albus, R.; Görner, K.; Milin, P.; Carpentier, S.; Krishnaramanujam, K.; Endisch, J.; de Wit, K.; Geerts, E.; Schweitzer, J.*: Market segmentation of domestic and commercial natural gas appliances, Deliverable report 2.1 (2020), thyga-project.eu/wp-content/uploads/20210125\_D2.1\_Market-Segmentation\_final.pdf
- Hagen, F. P.; Rinkenburger, A.; Günther, J.; Bockhorn, H.; Niessner, R.; Suntz, R.; Loukou, A.; Trimis, D.; Haisch, C.*: Spark discharge-generated soot: Varying nanostructure and reactivity against oxidation with molecular oxygen by synthesis conditions, Journal of Aerosol Science 143 (2020), S. 105530, (doi:10.1016/j.jaerosci.2020.105530).
- Hagen, F. P.; Bockhorn, H.; Störmer, H.; Loukou, A.; Suntz, R.; Trimis, D.*: Nanostructural and morphological characteristics of single soot aggregates during low-temperature oxidation, Proceedings of the Combustion Institute 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.06.338).
- Hansinger, M.; Zirwes, T.; Zips, J.; Pfitzner, M.; Zhang, F.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.*: The Eulerian stochastic fields method applied to



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



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



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



- large eddy simulations of a piloted flame with inhomogeneous inlet, *Flow, Turbulence and Combustion* 105 (2020), S. 837-867, (doi:10.1007/s10494-020-00159-5).
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahre 2019; DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Teil 1, gwf-Wasser I Abwasser (2020) Nr. 6.
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J.: Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahre 2019; DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Teil 2, gwf Gas + Energie (2020) Nr. 7-8.
- Häber, T.; Bockhorn, H.; Suntz, R.: Two-dimensional tomographic simultaneous multi-species visualization—part I: Experimental methodology and application to laminar and turbulent flames, *Energies* 13 (2020) Nr. 9, S. 2335, (doi:10.3390/en13092335).
- Häber, T.; Suntz, R.; Bockhorn, H.: Two-dimensional tomographic simultaneous multispecies visualization—Part II: Reconstruction accuracy, *Energies* 13 (2020) Nr. 9, S. 2368, (doi:10.3390/en13092368).
- Koch, S.; Kubach, H.; Velji, A.; Koch, T.; Hagen, F. P.; Bockhorn, H.; Loukou, A.; Trimis, D.; Suntz, R.: Impact of injection strategy on soot reactivity and particle properties of a GDI engine, *SAE International Technical Paper* (2020) Nr. 2020-01-0392, (doi:10.4271/2020-01-0392).
- Leicher, J.; Schaffert, J.; Cartenier, S.; Albus, R.; Görner, K.: Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part I: Theory, Deliverable report 2.2, [https://thyga-project.eu/wp-content/uploads/20200703-D2.2-Impact-of-hydrogen-admixture-on-combustion-processes-%E2%80%93-Part-I\\_Theory.pdf](https://thyga-project.eu/wp-content/uploads/20200703-D2.2-Impact-of-hydrogen-admixture-on-combustion-processes-%E2%80%93-Part-I_Theory.pdf).
- Max, D.: Mehr Akzeptanz durch praktische Anwendung, *FeuerTRUTZ Magazin* (2020) Nr. 4, S. 86-88.
- Schelb, D.; Dinkov, I.: Brandverhalten von Kunst- und Schaumstoffen in Notunterkünften, *BRANDSCHUTZ* (2020) Nr. 12/2020.
- Sentko, M. M.; Schulz, S.; Stelzner, B.; Anderlohr, C.; Vicari, M.; Trimis, D.: Determination of temperature and water-concentration in fuel-rich oxy-fuel methane flames applying TDLAS, *Combustion and Flame* 214 (2020), S. 336-245, (doi:10.1016/j.combustflame.2020.01.003).
- Steinhausen, M.; Luo, Y.; Popp, S.; Strassacker, C.; Zirwes, T.; Kosaka, H.; Zentgraf, F.; Maas, U.; Sadiki, A.; Dreizler, A.; Hasse, C.: Numerical investigation of local heat-release rates and thermo-chemical states in sidewall quenching of laminar methane and dimethyl ether flames, *Flow, Turbulence and Combustion* (2020), in press, (doi:10.1007/s10494-020-00146-w).
- Wang, Y.; Zhang, H.; Zirwes, T.; Zhang, F. B. H.; Zheng, C.: Ignition of dimethyl ether/air mixtures by hot particles: Impact of low temperature chemical reactions, *Proceedings of the Combustion Institute* 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.06.254).
- Wipfler, R.; Augustin, D.: Brandverhalten von „Tifontaine“ – Fackeln, *BRANDSCHUTZ* (2020) Nr. 7/2020.
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Häber, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Suntz, R.: Near wall dynamics of premixed flames, *Proceedings of the Combustion Institute* 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.06.058).
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Numerical simulations of turbulent flame propagation in a fan-stirred combustion bomb and Bunsen-burner at elevated pressure, *Flow, Turbulence and Combustion* (2020), in press, (doi:10.1007/s10494-020-00209-y).
- Zhang, F.; Heidarifatsmi, H.; Harth, S.; Zirwes, T.; Wang, R.; Fedoryk, M.; Sebbar, N.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Bockhorn, H.: Numerical evaluation of a novel double-concentric swirl burner for sulfur combustion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133 (2020), S. 110257, (doi:10.1016/j.rser.2020.110257).
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Müller, T.; Wachter, S.; Jakobs, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Kolb, T.: Effect of elevated pressure on air-assisted primary atomization of coaxial liquid jets: basic research for entrained flow gasification, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134 (2020), S. 110411, (doi:10.1016/j.rser.2020.110411).
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Quasi-DNS dataset of a piloted flame with inhomogeneous inlet conditions, *Flow, Turbulence and Combustion* 104 (2020) Nr. 4, S. 997-1027, (doi:10.1007/s10494-019-00081-5).
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Wang, Y.; Habisreuther, P.; Denev, J. A.; Chen, Z.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: In-situ flame particle tracking based on barycentric coordinates for studying local flame dynamics in pulsating Bunsen flames, *Proceedings of the Combustion Institute* 38 (2020), in press, (doi:10.1016/j.proci.2020.07.033).

#### Beiträge auf Konferenzen

- Appel, D.; Hagen, F. P.; Wagner, U.; Koch, T.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Influence of low ambient temperatures on the exhaust gas and deposit composition of gasoline engines. ASME 2020 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, American Society of Mechanical Engineers (ASME), online, November 4-6, 2020, (doi:10.1115/ICEF2020-2932).
- Fedoryk, M. Z. F.; Heidarifatsmi, H. S. N.; Harth, S.; Trimis, D.: Experimental and numerical investigations of a high-power density sulphur burner. 12<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, (22), online/live, Porto, Portugal, November 10-11, 2020.
- Galeazzo, F. C. C.; Zhang, F.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Zarzalis, N.; Trimis, D.: Vortrag: Implementation of an efficient synthetic inflow turbulence-generator in the open-source code OpenFOAM for 3D LES/DNS applications. 23<sup>rd</sup> Results and Review Workshop of the HLRS, online, Oct. 08-09, 2020.
- Langenthal, T. von; Zarzalis, N.; Loukou, A.: Experimental two-phase flow analysis inside a laboratory scale jet-engine combustion chamber using PIV. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2020)*, ASME, September 21-25, Virtual Conference, GT2020-16305, 2020, (doi:10.1115/GT2020-16305).
- Martinos, A.; Zarzalis, N.; Harth, S.: Analysis of ignition processes at combustors for aero engines at high altitude conditions with and without effusion cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2020)*, ASME, September 21-25, Virtual Conference, GT2020-16305, 2020, (doi:10.1115/GT2020-16173).
- Langone, L.; Sedlmaier, J.; Nassini, P. C.; Mazzei, L.; Harth, S.; Andreini, A.: Numerical modeling of gaseous partially premixed low-swirl lifted flame at elevated pressure. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2020)*, ASME, September 21-25, Virtual Conference, GT2020-16305, 2020, (doi:10.1115/GT2020-16305).
- Schneider, M.; Weinbrecht, P.; Wieland, C.; Weis, C.; Trimis, D.: Energy efficient coil coating process - ECCO. 12<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Nr. 14, Online Conference, Porto, Portugal, November 10-11, 2020.

Tavakkol, S.; Zirwes, T.; Denev, J. A.; Jamshidi, F.; Bockhorn, H.: Development of an OpenFOAM solver for numerical simulation of carbonization of biomasses in rotary kilns. The 15<sup>th</sup> OpenFOAM Workshop, Washington, DC, USA, June 22-25, 2020.

Zirwes, T.; Zhang, F.; Denev, J. A.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Lagrangian tracking of material surfaces in reacting flows. The

15<sup>th</sup> OpenFOAM Workshop, Washington, DC, USA, June 22-25, 2020.

Zirwes, T.; Zhang, F.; Denev, J. A.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.: Poster: Implementation of Lagrangian surface tracking for high performance computing. 23<sup>rd</sup> Results and Review Workshop of the HLRS, online, Oct. 08-09, 007-Rea-DNSbomb, 2020.

### 3. Aktivitäten des Teilinstituts und der DVGW-Forschungsstelle, Wasserchemie und Wassertechnologie

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

#### 3.1 Forschung und Lehre

##### Forschung

Das letzte Jahr war dominiert durch die Pandemie, die sich in allen Lebensbereichen Bahn gebrochen hat. Das Thema der mikrobiologischen Wasserqualität ist durch das Auftreten von SARS-CoV-2 Viren noch einmal verstärkt in den Vordergrund getreten. Konkret muss die Frage nach der mikrobiologischen Qualität der über kommunale und industrielle Kläranlagen eingeleiteten Wässer aufgeworfen und beantwortet werden (Bogler et al. 2020). **Bild 3.1** zeigt den mutmaßlichen Verbleib von SARS-CoV Viren in einer kommunalen Kläranlage auf, wie er sich aus dem aktuellen Kenntnisstand ergibt. Eine sichere Entfernung wäre im Ablauf Nachklärung nur mit weitergehenden (Desinfektions-) Verfahren möglich. Die Diskussion ist auch vor dem Hintergrund der Einleitungen von antibiotikaresistenten Bakterien und Antibiotikaresistenzgenen wichtig, da mit der sogenannten vierten Reinigungsstufe teilweise Fakten geschaffen werden, die die mikrobiologische Wasserqualität nur unzureichend adressieren.

Neben der Frage des Verbleibs von SARS-CoV Viren wurden im letzten Jahr in der Wasserchemie und Wassertechnologie verschiedene Projekte weitergeführt oder auch neu begonnen. Sehr erfreulich sind die Ergebnisse aus einem Projekt, das hier an gleicher Stelle im letzten Jahr vorgestellt wurde (BMBF Projekt „KompaGG-N“). Wir können zeigen, dass mit Hilfe der Membrantechnik die (Vor-)Behandlung von Gülle sehr gut möglich ist, in Abschnitt 3.2 werden die ersten Ergebnisse vorgestellt. Membranverfahren spielen zusehends eine wichtige Rolle bei der Aufbereitung verschiedenster wässriger Stoffströme. Neben der Behandlung von Gülle mit Membranverfahren werden auch organische Säuren aus Hydrolysaten mit Hilfe der Nanofiltration (BMBF Projekt „ProBioLNG“) angereichert oder die wässrige Phase aus der hydrothermalen Liquefaktion (HTL) von Klärschlamm behandelt (EU-Projekt).

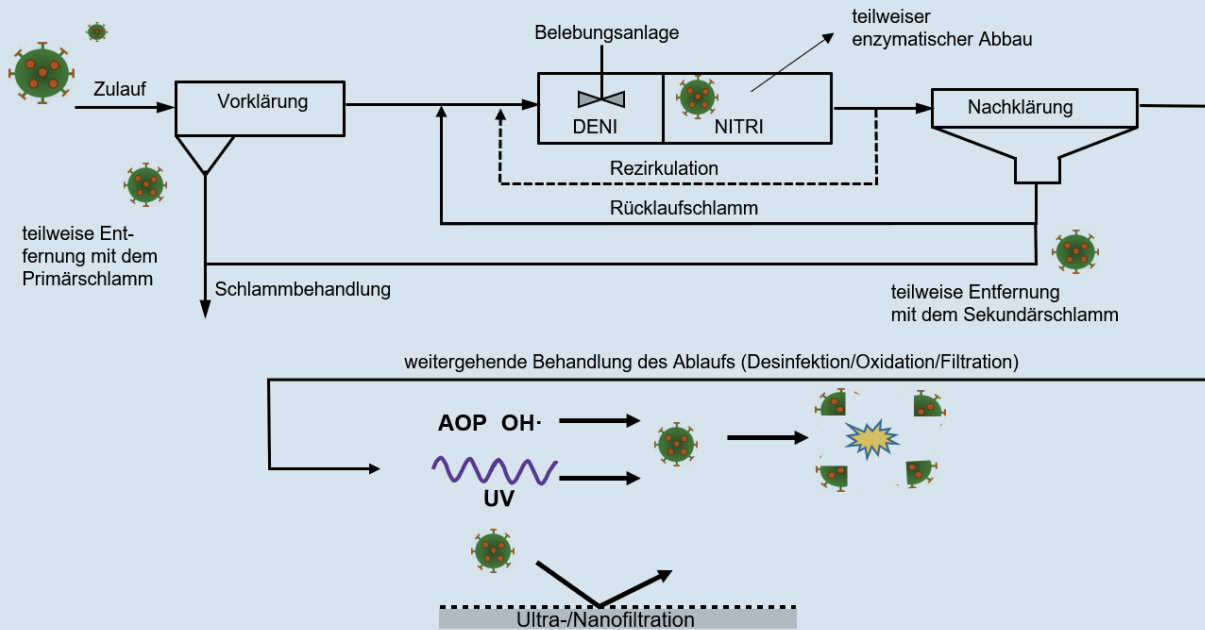
Einen wichtigen Beitrag zur Bereitstellung von Lithium aus „heimischen“ Quellen konnten Frau Saravia (EBI,

DVGW) und Herr Grimmer (Geowissenschaften, KIT) mit einer Patentanmeldung leisten, die die Gewinnung von Lithium aus Thermalwasser des Oberrheingrabens mit einem Membranverfahren beschreibt. Hier ist die Entwicklung des Verfahrens noch nicht abgeschlossen, unstrittig ist aber das sehr große Potenzial, das in dem Bereich vorhanden ist.

##### Lehre

Die Anzahl der Studienanfänger im Bachelorprogramm „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ konnte im WS 2020/21 im Vergleich zum Vorjahr gehalten werden. Dort liegt die Auslastung unter 100 %. Im Vergleich dazu sind die Anfängerzahlen im Bachelorprogramm „Bioingenieurwesen“ stabil hoch mit einer Auslastung von über 100 %. Durch die sehr hohen Anfängerzahlen in den vorigen Jahren sind die Studierenden in den Masterstudiengängen „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ und „Bioingenieurwesen“ nahezu identisch mit denen der Anfänger in Bachelorstudiengängen. Wie schon in den Vorjahren erfreut sich der englischsprachige Masterstudiengang „Water Science and Engineering“ einer sehr hohen nationalen und internationalen Nachfrage. Vor allem die Veranstaltung „Water Technology“, „Membrane Technology in Water Treatment“ und „Fundamentals of Water Quality“ sind integrale und sehr stark besuchte Veranstaltungen in den oben genannten Masterstudiengängen. Frau Dr. Borowska hat im Wintersemester zum ersten Mal die Veranstaltung „Micropollutants in Aquatic Environment – Determination, Elimination, Environmental Impact“ erfolgreich gehalten. Alle Veranstaltungen sind in den letzten Jahren an die Studiengänge angepasst worden.

Die Pandemie hat auch hier Spuren hinterlassen, da wir alle Vorlesungen seit April 2020 online anbieten. Erfreulicherweise konnten wir die Praktika zur Grundvorlesung „Allgemeine Chemie und Chemie der wässrigen Lösungen“ im letzten Jahr im Sommer noch zur Hälfte in Präsenz durchführen.



**Bild 3.1:** Die biologische Abwasserbehandlung ermöglicht den enzymatischen Abbau von organischen Kohlenstoffverbindungen, aber auch die Entfernung von Viren. Dabei wird ein Teil der SARS-CoV-Erreger im Vorklärbecken ausgeschleust, andere sorbieren an Belebtschlammflocken und werden dann mit dem Überschussschlamm entfernt. Im Anschluss an die Nachklärung besteht die Möglichkeit zur weiteren Behandlung. Das Abwasser kann mit weitergehenden Oxidationsverfahren (AOP), UV und/oder Filtration über verschiedene Membransysteme wie Ultrafiltration (z.B. in einem Membranbioreaktor, MBR) behandelt werden. Diese Abwässer können durch dichte Membranen in der Nanofiltration oder Umkehrosmose weiter aufbereitet werden, um eine vollständige Entfernung des Virus zu gewährleisten. Zum Teil übernommen aus (Bogler et al., 2020).

### Internationale Kooperationen in Forschung und Lehre

Die Forschung in der Wasserchemie und Wassertechnologie am Engler-Bunte-Institut erfreut sich international einer großen Aufmerksamkeit. Seit dem letzten Jahr haben wir einen Humboldt-Forschungsstipendiaten und eine -stipendiatin am Institut. Dr. Samuel Bunani aus Burundi untersucht die Abtrennung von Schwermetallen unter Einfluss von Huminstoffen mit der Elektrodialyse. Frau Dr. Keke Xiao aus China beschäftigt sich sowohl mit der Entfernung von organischen Spurenstoffen aus Klärschlamm, als auch mit den Prozessen, die bei der Desintegration von Klärschlamm auftreten. Sie setzt dabei auf unsere Kompetenz bei der Fraktionierung des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) und die Möglichkeit, daraus die Abbauewege besser identifizieren zu können. In 2021 werden zwei weitere Humboldt-Forschungsstipendiatinnen hinzukommen.

Der ABC Kurs (Advanced Biofilm Course), der 2020 in Karlsruhe stattfinden sollte, ist am Ende der Pandemie zum Opfer gefallen. Wir hoffen, dass wir den Kurs spätestens in 2022 wieder aufnehmen können. Stattgefunden hat aber die internationale Tagung „Biofilms9“, die wir zusammen mit den Angewandten Biowissenschaften des KIT (Johannes Gescher) Anfang Oktober 2020, während drei Tagen

online durchgeführt haben. Dazu konnten wir über 280 Teilnehmer und Teilnehmerinnen aus mehr als 30 Ländern gewinnen. Spannend war in der Tat, dass wir mit nur drei Personen die Vortragsessions organisiert haben. Die Postersessions konnten mit der Unterstützung aller Doktoranden und Doktorandinnen sehr individuell gestaltet werden, und boten den Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen eine optimale Plattform für Diskussionen.

### Promotionen

Im Jahr 2020 konnten vier Doktoranden und Doktorandinnen ihre Promotionen in unserem Institut abschließen. Im August verteidigte Frau M. Sc. **Annika Bauer** ihre Dissertation mit dem Titel „Einsatz der optischen Kohärenztomographie zur kontinuierlichen Überwachung von Scaling bei der Membrandestillation“ (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Mathias Ernst (Technische Universität Hamburg)). Die Arbeit ist im Folgenden kurz zusammengefasst:

Die Membrandestillation (MD) ist ein junges und innovatives Verfahren zur thermischen Aufbereitung hoch saliner Wässer. Die Separation anhand einer hydrophoben Membran wird durch den Phasenübergang von volatilen Komponenten bei gleichzeitigem Rückhalt der flüssigen Bestandteile erreicht. Im (Langzeit-)Betrieb bilden sich häufig

Deckschichten, die bei hoch salzigen Wässern hauptsächlich aus Scaling bestehen und zu einem Rückgang des Permeatstroms und einer Verschlechterung der Permeatqualität führen können. Die Detektion des Permeatstroms ist derzeit die Methode der Wahl, um auf die Bildung von Scaling zu schließen. Ein ganzheitliches, nichtinvasives Monitoring der Membran im laufenden MD-Betrieb existiert nicht, und auch die Bestätigung von Scaling auf der Membran wird vornehmlich ex situ nach Abschluss des Experiments durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wurde, basierend auf der optischen Kohärenztomographie (OCT), eine Methode zur sicheren Visualisierung und Quantifizierung von anorganischen Deckschichten entwickelt und im laufenden MD-Betrieb angewandt.

In einer vollautomatisierten Membrandestillationslaboranlage wurden konzentriertes Ostseewasser (OstWK) und Leitungswasser der Stadt Karlsruhe (KALW) behandelt und das Wachstum der Deckschicht auf den Einfluss variierender Prozessparameter mittels OCT untersucht. An einer manuellen Membrandestillationslaboranlage wurde zudem die chemische Reinigung mittels Zitronensäure und Natronlauge an einer Scalingschicht aus Calciumsulfat prozessbegleitend bewertet.

Basierend auf ImageJ und Matlab wurde eine Methode zur Bearbeitung der digitalen OCT-Datensätze entwickelt, die neben der Visualisierung vor allem eine sichere Quantifizierung des Scalings auf der Membranoberfläche ermöglichte. Gebildete Artefakte – hervorgerufen durch die Eigenschaften der Salzkristalle – wurden durch die PolyFIT Methode kompensiert und die Fehlerrate deutlich reduziert. Neu entwickelte Scalingparameter ermöglichten zudem eine objektive morphologische Bewertung des Membranzustandes und können als membranbasierte Prozessleitparameter eingesetzt werden.

Die gezielte Veränderung der Temperatur hatte einen maßgeblichen Einfluss auf die Bildung von Calcit-Deckschichten. Eine erhöhte Prozess Temperatur setzte die Löslichkeit der Ionen herab und führte damit zu einer massiven und schnellen Bildung von großen Kristallen auf der Membranoberfläche. Die schrittweise Erhöhung des Permeatstroms  $J_p$  (temperaturgekoppelt) führte ebenfalls zur verstärkten Bildung von Calcit-Scaling. Dies wurde durch das vermehrte Auftreten von temporären lokalen Superkonzentrationen bei hohem  $J_p$  erklärt. Die Variation der Konfiguration von Direct Contact zu Air Gap hatte keinen Einfluss auf das Wachstum der anorganischen Deckschicht. Durch die Änderung der Wassermatrix bildeten sich ähnliche Scalingschichten aus Calcit und Magnesiumcalcit. Beide führten zur identischen Reduktion des Permeatstroms, die durch unterschiedliche Bedeckungsgrade in Kombination mit signifikant verschiedenen Kristallmorphologien hervorgerufen wurde. Die alleinige Detektion von  $J_p$  lieferte damit nur unzureichend genaue Informationen, die nur eingeschränkt für die Interpretati-

on von Scaling genutzt werden konnten. Die Bestimmung der Scalingparameter verdeutlichte die Unterschiede hingegen klar und lieferte neben der Wachstumsgeschwindigkeit auch Informationen über die Morphologie der Kristalle.

Die Menge an chemisch abgereinigtem Calciumsulfat wurde in situ untersucht und anhand der Scalingparameter quantifiziert. Neben dem idealen Zeitpunkt zur Reinigung konnten damit auch die Reinigungsdauer und die Effektivität der verwendeten Chemikalien bestimmt werden. Dabei zeigte Zitronensäure eine verbesserte Reinigungskinetik gegenüber Natronlauge.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode stellt damit ein Werkzeug zur ganzheitlichen Optimierung der Membrandestillation in Bezug auf die Bildung von Scaling dar und liefert durch die nichtinvasive Anwendung Informationen zur morphologischen Entwicklung der Deckschicht.

Im November schloss Frau M. Sc. **Luisa Gierl** ihre Dissertation mit dem Thema „Untersuchungen zum Einfluss von Eisen auf die Struktur und mechanischen Eigenschaften von *Bacillus subtilis* Biofilmen“ ab (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Johannes Gescher (KIT)): Biofilme sind Aggregationen von Mikroorganismen, die in einer Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) eingebettet sind und hauptsächlich an Grenzflächen in wässrigen Umgebungen auftreten. Die Biofilmforschung ist von großem Interesse, um operative Parameter in Tröpfchen-Bewässerungssystemen, Kläranlagen, Trinkwasseraufbereitungssystemen oder auch in Reaktorsystemen zur Produktion von Chemikalien bestimmen zu können.

In der Dissertation wurde deshalb auf die Biofilmentwicklung sowie auf die Interaktion des Biofilms mit seiner Umgebung (Fluid-Struktur-Dynamik) unter dem Einfluss verschiedener Eisenkonzentrationen ( $\beta = 0,25$  und  $2,5$  mg/L  $Fe^{2+}$ ) sowie Volumenströmen ( $Q = 1$  und  $5$  mL/min) näher eingegangen. Dabei fanden Wachstumsexperimente im Hinblick auf strukturelle Biofilmeigenschaften sowie Deformationsstudien unter dem Aspekt der Analyse mechanischer Biofilmeigenschaften in Fließzellen statt. Weiterhin wurde die Automatisierung von Laborabläufen sowie die Automatisierung der Versuchsauswertung näher betrachtet. Die Untersuchungen erfolgten dabei mittels optischer Kohärenztomographie (OCT). Die OCT ist ein Verfahren, welches die Biofilmstruktur in situ, nichtinvasiv und hochauflösend abbildet. Die Integration der OCT in ein neues und automatisiertes Kultivierungs- und Monitoringsystem zeigte hier die Notwendigkeit einer Mindestanzahl von statistisch relevanten Biofilmreplikaten und die Möglichkeit, diese mit dem System simultan abzubilden.

Eine Differenzierung der Biofilmentwicklung bzw. -stabilität unter verschiedenen Wachstumsbedingungen konnte unter Anwendung des Kultivierungs- und Monitoringsystems beurteilt werden. Die Arbeit zeigt dabei, dass eine Zugabe von  $Fe^{2+}$  zum Kultivierungsmedium die

Differenzierung zu voll entwickelten Biofilmen maßgeblich beeinflusst. Es wurde nachgewiesen, dass erhöhte Mengen an  $\text{Fe}^{2+}$  (2,5 mg/L) das Biofilmwachstum bezogen auf die Biofilmdicke, Fließkanalbedeckung sowie weitere Strukturparameter förderte. Dabei lagerten sich unterschiedliche Modifikationen von Eisenoxidhydroxiden  $x\text{-FeO(OH)}$  in die Biofilmmatrix ein.

Innerhalb von Deformationsstudien wurde weiterhin illustriert, dass auch nach Wandschubspannungen von  $\tau_w = 16$  Pa noch Biofilmmasse in den Fließzellen vorhanden war, was vor allem für Aufreinigungsprozesse in Trinkwassersystemen von Bedeutung ist. Weiterhin zeigten die Versuche, dass ein erhöhtes Vorkommen von  $\text{Fe}^{2+}$  im Nährmedium zu einer erhöhten Kompressibilität der Biofilme führt.

Die Ergebnisse der Dissertation begründen die Notwendigkeit der Durchführung von Replikaten in der Biofilmforschung. Weiterhin zeigen sie auch die Notwendigkeit der Nutzung einer Vielzahl von Strukturparametern zur vollständigen Analyse der Fluid-Biofilm-Interaktion und der Biofilmentwicklung. Auch wird demonstriert, dass eine Automatisierung der Analyse mechanischer Biofilleigenschaften sinnvoll ist. Da die physikalische Struktur eines Biofilms die Interaktion mit seiner Umgebung determiniert, sind die Ergebnisse von großer Bedeutung für den Forschungsbereich Biofilmkontrolle.

Ebenfalls im November konnte Herr M. Sc. **Jung** seine Dissertation zum Thema „Raman microspectroscopy for in-situ measurement of concentration polarization in nanofiltration“ erfolgreich verteidigen (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Cristian Picioreanu (King Abdullah University of Science and Technology, Saudi-Arabien)). Im Folgenden ist eine Kurzfassung der Arbeit abgedruckt: Konzentrationspolarisation (CP) beschreibt ein Phänomen des Stofftransports gelöster Teilchen an der Membranoberfläche druckbetriebener Membrananlagen. Die sich bildende Grenzschicht hat eine Dicke in der Größenordnung von Mikrometern. Daher ist CP experimentell nur schwer zugänglich, weshalb das Phänomen in der allgemeinen Forschung meist mit indirekten Methoden untersucht wird. Diese Arbeit verfolgt jedoch einen direkten Ansatz und stellt ein neues Messkonzept für die nicht-invasive Untersuchung der CP in situ vor.

Mittels Raman-Mikrospektroskopie (RM) wurde die Konzentrationspolarisationsgrenzschicht (CPL) von Sulfat im Labor in situ gemessen. Dafür wurde eigens eine Nanofiltrations(NF)-Flachkanalzelle entwickelt, die es erlaubt, die CPL in einer Umgebung zu messen, welche repräsentativ für in der Praxis verwendete Wickelmodule ist (Kanalhöhe 0,7 mm, ausstattbar mit kommerziellen Spacern). Ziel war, RM als neue Messtechnik für die ortsaufgelöste Untersuchung von Konzentrationsgradienten in der NF und Umkehrosmose (RO) vorzustellen.

Die NF-Membrananlage wurde mit einer Modelllösung (Magnesiumsulfat gelöst in demineralisiertem Wasser) bei

einem konstanten Systemdruck von 10 bar betrieben. Übliche Messparameter zur Bestimmung der Filtrationsleistung, unter anderem Ausbeute, Leitfähigkeit im Permeat etc., wurden aufgezeichnet. Der Membranrückhalt betrug mindestens 96 %. Konzentrationsprofile wurden mit und ohne Spacer für Sulfatkonzentrationen von 10 und 20 g/L im Zulauf an mehreren Positionen entlang des Membrankanals gemessen. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde im Bereich 0,004 bis 0,2 m/s variiert, wodurch eine Ausbeute zwischen 0,5 und 31 % erreicht wurde. Es wurden sowohl 1D-Tiefenprofile als auch 3D-Scans durchgeführt. Die Messergebnisse zeigten übereinstimmend, dass eine höhere Ausbeute zu einer Konzentrationserhöhung an der Membranoberfläche führt. Zudem wurde bei Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung mm/s, ein Einfluss der Membranorientierung beobachtet. Filtration entgegen der Schwerkraft hatte eine höhere Ausbeute und Permeatqualität zur Folge. Die RM Messungen zeigten, dass dafür ein verbesserter Stofftransport an der Membranoberfläche durch natürliche Konvektion (Rayleigh-Taylor-Instabilität, RTI) verantwortlich ist. Damit wurde hierin auch erstmals RTI in einem NF-System in situ gemessen. Bei den RM Messungen mit Spacer zeigte sich bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten eine charakteristische Konzentrationsverteilung. Der Vergleich mit simulierten Strömungsprofilen in der Fachliteratur zeigte eine große Ähnlichkeit zwischen Simulations- und Messergebnissen.

Inwieweit RM auch auf die Untersuchung komplexer Foulingphänomene in der Membranfiltration angewendet werden kann, wurde anhand von Biofouling untersucht. Dazu wurde die NF-Anlage mit einer Nährlösung betrieben, welcher Kulturen von *Bacillus subtilis* zugesetzt wurden. Ziel war es, den Einfluss eines Biofilms an der Membranoberfläche auf die CPL zu untersuchen. Zur Analyse des Biofilms wurde die optische Kohärenztomographie (OCT) verwendet. Dabei wurde festgestellt, dass die mechanischen Eigenschaften des Biofilms mit den Betriebsparametern der Membranfiltration zusammenhängen. Insbesondere führten Änderungen des Permeatflusses zu Änderungen der Biofilmdicke durch Kompression und Relaxation. Es wurden Konzentrationsprofile für vier Biofilme unterschiedlicher Dicke im Bereich von 20 bis 100  $\mu\text{m}$  gemessen. Die Ergebnisse bestätigten, dass Biofilme zu einer Erhöhung der Salzkonzentration an der Membranoberfläche führen und damit weitere Foulingtypen, insbesondere Scaling, gefördert werden.

Die Möglichkeiten und Schwierigkeiten der Messmethode werden durchgängig kritisch diskutiert. Sphärische Aberration aufgrund der Lichtbrechung beim Durchgang durch verschiedene Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes stellt eine der größten Herausforderungen für das Messprinzip dar. Sie führt zu Verlust von Signalintensität und hat eine Verminderung der Tiefenschärfe zur

Folge. Komplexe Strömungsfelder, welche eine Schichtung von Salzlösung unterschiedlicher Brechkraft zur Folge haben, führen zu einer Unterbewertung der Salzkonzentration an der Membranoberfläche. Die beobachtete Komprimierbarkeit der Biofilme stellt eine weitere Problematik für die Messmethodik dar und hat bei größeren Filmdicken eine deutliche Überbewertung der Salzkonzentration an der Membranoberfläche zur Folge.

In dieser Arbeit wurden Konzentrationsprofile in der Grenzschicht über einer NF-Membran direkt, nichtinvasiv und orts aufgelöst gemessen. Das vorgeschlagene Messkonzept ist praktisch nutzbar, benutzerfreundlich und erlaubt darüber hinaus die Nutzung von Spacern sowie die Untersuchung komplexer Foulingphänomene.

Frau M.Sc. **Rowayda Ali** schloss ihre Doktorarbeit im Dezember 2020 ab. Der Titel ihrer Dissertation lautet „Propionic acid production through anaerobic fermentation of food waste“ (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Johannes Gescher (KIT)):

Das Streben nach der Minimierung von Abfällen in Verbindung mit der Rückgewinnung von Ressourcen hat die Aufmerksamkeit auf die Verwendung von Lebensmittelabfällen als Ausgangsstoffen für die Herstellung hochwertiger Produkte gelenkt. Weltweit fallen jährlich rund 1,3 Milliarden Tonnen Lebensmittelabfälle an. Diese Abfälle werden immer noch auf Deponien abgeladen oder verbrannt, was zu Treibhausgasemissionen führt. Die biologische Umwandlung von Lebensmittelabfällen in Mehrwertprodukte wie Propionsäure ist daher ein vielversprechender Ansatz für die Entwicklung einer biobasierten Wirtschaft und die Verringerung der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren fossilen Ressourcen. Ziel der vorliegenden Dissertation war es, die Propionsäureproduktion aus Lebensmittelabfällen durch anaerobe Fermentation zu verbessern. Dementsprechend wurden verschiedene Batch- und halbkontinuierliche Fermentationsexperimente bei mesophiler Temperatur (30 °C) durchgeführt. Der Einfluss des Inokulums, des pH-Werts und der thermischen Vorbehandlung des Substrats wurde mit Batch-Fermentationstests im Labormaßstab untersucht. Als Substrat wurde veganes Hundefutter als Modell für Küchenabfälle verwendet. Die ausgewählten Inokula umfassten eine gemischte Bakterienkultur, die über 24 Monate für das Wachstum auf Cellulose selektiert wurde, Milch und Ziegenweichkäse. Die Batchtests wurden bei pH 4, pH 6 und pH 8 sowohl für unbehandeltes als auch für vorbehandeltes Hundefutter durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Produktion von Propionsäure und anderen flüchtigen Fettsäuren deutlich vom gewählten Inokulum und dem eingestellten pH-Wert abhängt.

Die maximalen Propionsäureproduktionsraten und Ausbeuten wurden für das Käse-Inokulum bei pH 6 unter Verwendung von unbehandeltem und vorbehandeltem Hundefutter bestimmt. Die Propionsäurekonzentration erreichte 10 bzw. 26,5 g/L. Die höchste Konzentration an flüchtigen Fettsäuren von ungefähr 60 g/L wurde erhalten, wenn Milch als Inokulum verwendet wurde, um vorbehandeltes Hundefutter bei pH 8 zu fermentieren. Die Verbesserung der Propionsäureproduktion aus Hundefutter und Küchenabfällen wurde auch in einem halbkontinuierlichen anaeroben 12 L-Hydrolysereaktor untersucht. Drei Betriebsläufe wurden bei einem pH-Wert von  $6,0 \pm 0,1$  jeweils für mehr als drei Monate durchgeführt. Dabei wurden zwei der auch in den Batchtests untersuchten Inokula verglichen, die gemischte mikrobielle Kultur und die in Ziegenkäse enthaltene Kultur. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Ziegenkäse-Inokulum für die Propionsäureproduktion effizienter war, was zu einer Erhöhung um 50 % führte. Die höchste Propionsäurekonzentration wurde mit 139 mmol/L unter Verwendung von Hundefutter und mit 105 mmol/L unter Verwendung von Küchenabfällen erreicht. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die Propionsäureproduktion durch eine Kombination einer relativ hohen hydraulischen Retentionszeit (HRT) mit einer relativ niedrigen organischen Beladungsrate (OLR) erhöht wurde, da dies eine ausreichende Zeit für die vollständige Verarbeitung der komplexen organischen Substrate sicherstellt. Weiterhin wurde die Vorbehandlung der Fermentationsbrühen von fermentiertem Hundefutter und Küchenabfällen als erster Schritt im Propionsäureaufbereitungsprozess untersucht. Hierbei wurden zunächst unter Verwendung einer Trenneinheit große Partikel aus der Fermentationsbrühe entfernt, in der Folge wurden die übrigen suspendierten Partikel durch ein getauchtes Mikrofiltrationsmembransystem abgetrennt. Es wurde gezeigt, dass die Trenneinheit ein effizientes Vorbehandlungsverfahren für den Mikrofiltrationsprozess ist. Die Einheit konnte mehr als 86 % der gesamten suspendierten Feststoffe aus der Fermentationsbrühe entfernen. Die Mikrofiltrationsmembran wurde erfolgreich zur Abtrennung von Partikeln im Hydrolysat eingesetzt. Die Verwendung von Mikrofiltrationsmembranen mit einer Porengröße von 0,1 µm, 0,45 µm und 0,8 µm führte zur Passage von ca. 90 % der flüchtigen Fettsäuren. Darüber hinaus entfernten die Membranen mehr als 85 % der gesamten suspendierten Feststoffe (TSS). Der höchste kritische Flux von ungefähr 14 L/(m<sup>2</sup> h) wurde unter Verwendung des Küchenabfallhydrolysats, der Membran mit einer Porengröße von 0,45 µm und einer Begasung von 80 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> h) beobachtet. Die beiden erstgenannten Arbeiten sind bereits in der Schriftenreihe Bereich Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie, erschienen (Band 79 und Band 80, ISSN 2195-2973). Die Arbeiten von Herrn Jung (Band 81) und Frau Ali (Band 82) werden in Kürze gedruckt, erscheinen aber mit einer neuen Nummer (ISSN 2747-819X (Print)). Sie sind dann

zentrations erreichte 10 bzw. 26,5 g/L. Die höchste Konzentration an flüchtigen Fettsäuren von ungefähr 60 g/L wurde erhalten, wenn Milch als Inokulum verwendet wurde, um vorbehandeltes Hundefutter bei pH 8 zu fermentieren. Die Verbesserung der Propionsäureproduktion aus Hundefutter und Küchenabfällen wurde auch in einem halbkontinuierlichen anaeroben 12 L-Hydrolysereaktor untersucht. Drei Betriebsläufe wurden bei einem pH-Wert von  $6,0 \pm 0,1$  jeweils für mehr als drei Monate durchgeführt. Dabei wurden zwei der auch in den Batchtests untersuchten Inokula verglichen, die gemischte mikrobielle Kultur und die in Ziegenkäse enthaltene Kultur. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Ziegenkäse-Inokulum für die Propionsäureproduktion effizienter war, was zu einer Erhöhung um 50 % führte. Die höchste Propionsäurekonzentration wurde mit 139 mmol/L unter Verwendung von Hundefutter und mit 105 mmol/L unter Verwendung von Küchenabfällen erreicht. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die Propionsäureproduktion durch eine Kombination einer relativ hohen hydraulischen Retentionszeit (HRT) mit einer relativ niedrigen organischen Beladungsrate (OLR) erhöht wurde, da dies eine ausreichende Zeit für die vollständige Verarbeitung der komplexen organischen Substrate sicherstellt. Weiterhin wurde die Vorbehandlung der Fermentationsbrühen von fermentiertem Hundefutter und Küchenabfällen als erster Schritt im Propionsäureaufbereitungsprozess untersucht. Hierbei wurden zunächst unter Verwendung einer Trenneinheit große Partikel aus der Fermentationsbrühe entfernt, in der Folge wurden die übrigen suspendierten Partikel durch ein getauchtes Mikrofiltrationsmembransystem abgetrennt. Es wurde gezeigt, dass die Trenneinheit ein effizientes Vorbehandlungsverfahren für den Mikrofiltrationsprozess ist. Die Einheit konnte mehr als 86 % der gesamten suspendierten Feststoffe aus der Fermentationsbrühe entfernen. Die Mikrofiltrationsmembran wurde erfolgreich zur Abtrennung von Partikeln im Hydrolysat eingesetzt. Die Verwendung von Mikrofiltrationsmembranen mit einer Porengröße von 0,1 µm, 0,45 µm und 0,8 µm führte zur Passage von ca. 90 % der flüchtigen Fettsäuren. Darüber hinaus entfernten die Membranen mehr als 85 % der gesamten suspendierten Feststoffe (TSS). Der höchste kritische Flux von ungefähr 14 L/(m<sup>2</sup> h) wurde unter Verwendung des Küchenabfallhydrolysats, der Membran mit einer Porengröße von 0,45 µm und einer Begasung von 80 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> h) beobachtet. Die beiden erstgenannten Arbeiten sind bereits in der Schriftenreihe Bereich Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie, erschienen (Band 79 und Band 80, ISSN 2195-2973). Die Arbeiten von Herrn Jung (Band 81) und Frau Ali (Band 82) werden in Kürze gedruckt, erscheinen aber mit einer neuen Nummer (ISSN 2747-819X (Print)). Sie sind dann

**Tabelle 3.1:** In Arbeit befindliche, im Jahre 2020 abgeschlossene\* und neu begonnene Forschungsprojekte.

Schwerpunkt	Projektmitarbeiter/Innen	Thema	Förderung
Wasserqualität	Alondra Alvarado Stephanie West Gudrun Abbt-Braun	Hydrolyse partikulärer organischer Stoffe bei der anaeroben und aeroben Abwasserbehandlung*	National Council on Science and Technology, Mexiko, Dt. Akad. Austauschdienst (DAAD), DVGW
	Samuel Bunani	Einsatz der Elektrodialyse zur Abtrennung von Schwermetallen	Alexander von Humboldt Stiftung, KIT
	Amélie Chabilan Ewa Borowska	Verhalten von Antibiotika in Flüssen und Flusssedimenten und ihre Auswirkungen auf die Ausbreitung der Antibiotikaresistenzen in der natürlichen Umwelt	Baden-Württemberg Stiftung, KIT
	Harald Horn	DVGW-Innovations-Scouting-Wasser	DVGW
	Stephanie Kaschewski	Anwendung neuer Technologien, wie das Internet of Things und künstliche Intelligenz, zur Verbesserung der Trinkwasserversorgung in Wohngebäuden	BOSCH
	Tim Schwarzenberger	Verifizierung und Optimierung eines kombiniert variablen Ansatzes zur mikrobiologischen Validierung von mono- und polychromatischen UV-Systemen	TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser
	Lara Stelmaszyk	Methodenentwicklung für die Quantifizierung von Antibiotikaresistenzgenen anhand PCR-basierter Verfahren und Kulturverfahren	TZW
	Stephanie West	Weiterentwicklung und Validierung der Durchflusssytmometrie als schnelle Detektionsmethode für Bakterien in Roh- und Trinkwasser (FlowDetect; Verbundprojekt)*	DVGW
	Stephanie West	Mikroorganismen und Turbulenz – Wasserqualitätsvorhersage (MOAT, Verbundprojekt)*	Baden-Württemberg Stiftung
	Stephan Zimmermann Ewa Borowska	Verhalten von Krebsmedikamenten bei Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung	KIT
Wasser-technologie	Rowayda Ali Jinpeng Liu Andrea Hille-Reichel Florencia Saravia Michael Wagner	Entwicklung von Kaskadenreaktoren zur Umsetzung biogener Abfallströme in Wasserstoff und Propionat (RECICL; Verbundprojekt)	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Islamic Development Bank, Saudi Arabia
	Andreas Netsch Michael Wagner	Entwicklung und Demonstration einer energieeffizienten bioelektrochemischen Abwasserbehandlung im technischen Maßstab mit Einhaltung gesetzlicher Anforderungen zur Ablaufqualität (Demo-BioBZ; Verbundprojekt)	BMBF
	Giorgio Pratofiorito Florencia Saravia	Entwicklung einer ressourcen- und kosteneffizienten Prozesskette zur dezentralen Produktion von LNG auf der Basis innovativer Konversions-, Power-to-Gas- und Gasaufbereitungsverfahren (ProBioLNG; Verbundprojekt)	BMBF
	Prantik Samanta Florencia Saravia	Komplettaufbereitung von Gülle und Gärresten unter Berücksichtigung regionaler Stoffstromkonzepte für Nähr- und Schadstoffe (KompaGG-N; Verbundprojekt)	BMBF
	Ali Sayegh Florencia Saravia	Verarbeitung hydrothormaler Verflüssigungsprodukte mit Membrantechnologien (Verbundprojekt)	Europäische Kommission
	Michael Sturm	Mikroplastikfreie Meersalzgewinnung – Entwicklung eines methodologischen und technologischen Verfahrens zur Reduktion der Mikroplastikbelastung bei der Meersalzgewinnung	Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) – Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
	Dámare Araya, Valenzuela Florencia Saravia	Fallstudie zur Implementation von Wassertechnologien in ariden Gebieten	National Agency of Research and Development, Chile, DAAD, KIT
	Biologische Abwasserreinigung	Keke Xiao	Verhalten organischer Stoffe (refraktäre Stoffe, organische Spurenstoffe) bei der Klärschlammbehandlung

Biologische Grenzflächen	Luisa Gierl Michael Wagner	Nutzung von multidimensionalen Bilddaten der optischen Kohärenztomographie zur Entwicklung eines multiphysikalischen Biofilmmodells*	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
	Max Hackbarth Andrea Hille-Reichel Michael Wagner	Mikrobielle Elektrosynthese zur Bioplastik Produktion aus Rauchgas (BioElectroPlast; Verbundprojekt)*	BMBF
	Max Hackbarth Andrea Hille-Reichel Harald Horn	Biotechnologische Produktion von Plattform-Chemikalien mittels Anoden-assistierter Fermentation (Bio-ProChem; Verbundprojekt)*	Bioökonomie, Land Baden-Württemberg
	Max Hackbarth Andrea Hille-Reichel Harald Horn	Extremophile Kathodenbiofilme als Power-to-X Biokatalysatoren (EKatBio; Verbundprojekt)*	BWPLUS, Land Baden-Württemberg
	Max Miehle Andrea Hille-Reichel	Kontinuierliche Bioproduktion mit maßgeschneiderten Biokatalysatoren in bioelektrochemischen Fermentern (ContiBio-Elect; Verbundprojekt)	BMBF
	Florian Ranzinger Michael Wagner Gisela Guthausen	Untersuchung poröser Medien mittels Magnetresonanztomographie	KIT
	Lizheng Guo Harald Horn	Desinfektion und Biofilme in Trinkwasserverteilungssystemen	Chinese Academy of Science, KIT

ebenfalls über das Sekretariat des Lehrstuhls in gedruckter Form erhältlich und werden über KITopen elektronisch zugänglich sein.

**3.2 In Arbeit befindliche, im Jahre 2020 abgeschlossene\* und neu begonnene Forschungsprojekte**

Die 2020 in den Forschungsschwerpunkten Wasserqualität, Wassertechnologie, Biologische Abwasserreinigung und Biologische Grenzflächen bearbeiteten Projekte sind in **Tabelle 3.1** aufgeführt.

Im Folgenden werden zwei der in **Tabelle 3.1** aufgeführten Projekte ausführlicher vorgestellt. Sie befassen sich mit der **Evaluierung der Verbreitung von Antibiotika und Antibiotikaresistenzgenen in der Umwelt** und der **Nutzung von Membranverfahren zur Aufreinigung entsprechender hochbelasteter Abwässer**.

**Untersuchung des Verhaltens von Antibiotika in Flüssen und Flusssedimenten und ihre Auswirkung auf die Ausbreitung der Antibiotikaresistenzen in der natürlichen Umwelt**

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

Antibiotika werden in der Human- und Veterinärmedizin gegen bakterielle Infektionen eingesetzt und stellen eine der wichtigsten Gruppen von Pharmazeutika dar. Eines der drängendsten Probleme, das derzeit im Zusammenhang mit Antibiotika diskutiert wird, ist das vermehrte

Auftreten von Antibiotikaresistenzen. Schätzungen gehen davon aus, dass z. Zt. 50.000 Menschen pro Jahr in Europa und in den USA an den Folgen von Antibiotikaresistenzen sterben. Trotz ihres unbestreitbaren Nutzens, hat der übermäßige Einsatz von Antibiotika weitreichende Auswirkungen auf die Umwelt. In den letzten Jahren ist die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen insbesondere in der aquatischen Umwelt zunehmend in den Fokus der Forschung gerückt.

Unter anderem gelangen Antibiotika durch behandeltes Abwasser oder durch Abfluss von Gülle, die zur Düngung auf landwirtschaftlich bewirtschafteter Fläche aufgebracht wird, in Flüsse oder Seen. In einem vorangegangenen Projekt am Engler-Bunte-Institut, Teilinstitut Wasserchemie und Wassertechnologie, konnte gezeigt werden, dass die die Resistenzen codierenden sogenannten Antibiotikaresistenzgene durch ihre Bindung an Abwasserpartikel ebenfalls durch den Kläranlagenablauf in die aquatische Umwelt eingetragen werden (Brown et al. 2019). Umstritten ist allerdings, welches Phänomen, Eintrag von Antibiotika oder Antibiotikaresistenzgenen, den Hauptanteil an der Verbreitung der Antibiotikaresistenzen trägt.

Zahlreiche wissenschaftliche Studien deuten darauf hin, dass Antibiotika in subinhibitorischen Konzentrationen verschiedene Mechanismen auslösen, die zur Entstehung und Verbreitung von Antibiotikaresistenzen führen. Andererseits ist nicht geklärt, ob die in der aquatischen Umwelt gemessenen Konzentrationen, sowohl in der Wassersäule als auch in den Sedimenten, hoch genug sind, um diese Mechanismen in den Mikroorganismen zu initiieren. Möglicherweise kann die Adsorption einiger



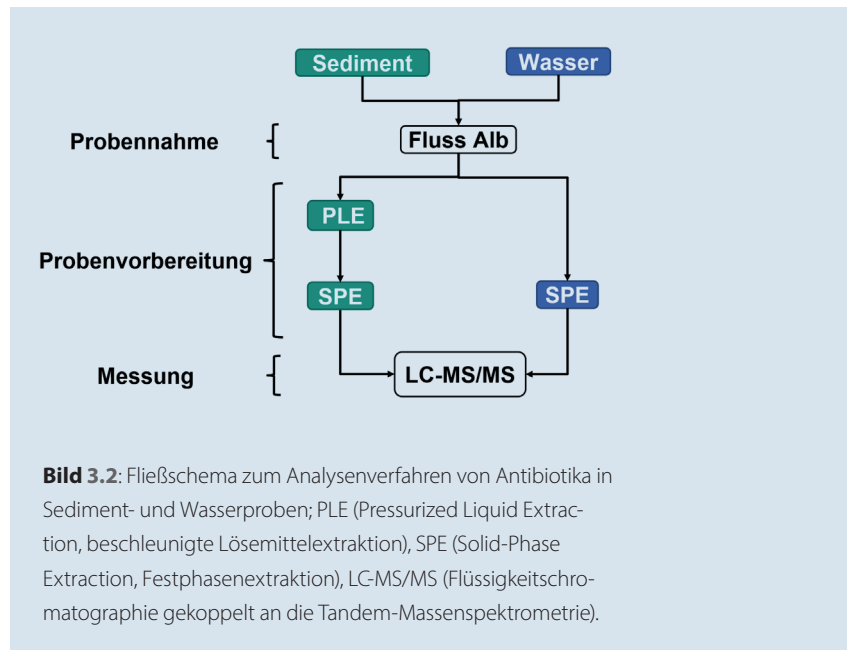
Antibiotika an Flusssedimenten zu einer lokalen Akkumulation der Stoffe führen.

Antibiotika treten in der Größenordnung von ng/L in Oberflächengewässern und in ng/g in Sedimenten auf. Aufgrund der geringen Konzentrationen und der komplexen Matrix ist die quantitative Bestimmung eine analytische Herausforderung und bedarf einer aufwendigen Probenvorbereitung (siehe **Bild 3.2**). Die bereits am Institut entwickelte analytische Methode zur Bestimmung von Antibiotika in Wasserproben wurde auf 19 verschiedene Stoffe erweitert und um ihre Bestimmung in Flusssedimenten ergänzt.

Die entwickelten analytischen Methoden wurden im Rahmen einer Feldstudie in der Alb, ein die Stadt Karlsruhe durchziehendes und als Vorfluter genutztes Fließgewässer, angewendet (**Bild 3.3**). Dadurch soll der Verbleib, die Verteilung und Persistenz der Antibiotika in den verschiedenen Umweltkompartimenten Wassersäule und Sediment untersucht werden.

Durch eine Probenvorbereitung mittels Festphasenextraktion (Solid-Phase Extraction, SPE) werden die Antibiotika an einem Adsorbens angereichert und störende Matrixbestandteile entfernt. Mit organischen Lösemitteln (z. B. Methanol) werden sie anschließend von der Festphase gespült.

Bei Sedimentproben ist die Probenvorbereitung aufwendiger, da die Antibiotika erst in eine flüssige Phase



**Bild 3.2:** Fließschema zum Analysenverfahren von Antibiotika in Sediment- und Wasserproben; PLE (Pressurized Liquid Extraction, beschleunigte Lösemittelextraktion), SPE (Solid-Phase Extraction, Festphasenextraktion), LC-MS/MS (Flüssigkeitschromatographie gekoppelt an die Tandem-Massenspektrometrie).

überführt werden müssen. Die beschleunigte Lösemittelextraktion (Pressurized Liquid Extraction, PLE) stellt dabei eine vielversprechende Methode dar. In die erhitzte Extraktionszelle wird Lösemittel bis zu einem Druck von 10,34 MPa gepumpt. Nach einer Interaktionszeit von 5 bis 15 Minuten wird das Lösemittelgemisch ausgeblau-



**Bild 3.3:** Einleitung des Kläranlagenablaufs (links im Bild) in die Alb (rechts).



**Bild 3.4:** Probenahmestelle Standort 1 (A), Probenahme (B), Schweinestall (C).

sen. Der Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden. Um eine Wiederfindungsrate von mindestens 45 % zu erzielen, ist eine Optimierung der Extraktionsparameter wie die Art des Lösemittels, die Temperatur und die Anzahl an Extraktionszyklen notwendig.

Die quantitative Bestimmung erfolgt mittels Flüssigkeitschromatographie gekoppelt an die Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS). Durch eine Messung können alle 19 Antibiotika erfasst werden. Die LC-MS/MS stellt ein sehr sensibles Analyseverfahren mit Nachweisgrenzen im unterem ng/L-Bereich dar.

[1] Brown, P.C.; Borowska, E.; Schwartz, T.; Horn, H.: Impact of the particulate matter from wastewater discharge on the abundance of antibiotic resistance genes and facultative pathogenic bacteria in downstream river sediments. *Science of The Total Environment* 649, 1171-1178, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.394>.

### Zweistufige Aufreinigung von Schweinegülle und Gärresten mit Membranverfahren

**Prantik Samanta, Harald Horn, Florencia Saravia; Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, 02WQ1516D)**

Gülle ist ein unvermeidbares Nebenprodukt der Tierhaltung und wurde in der Vergangenheit als Dünger eingesetzt. Die Umweltprobleme entstehen hauptsächlich, wenn die Dosierung der auf dem Feld ausgebrachten Düngemittel und Gülle über dem Pflanzenbedarf liegt und überschüssige Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor in Gewässer eingetragen werden. Dies führt zu einer erhöhten Nitratbelastung der Grundwasserspeicher und/oder zur Eutrophierung in den Oberflächengewässern.

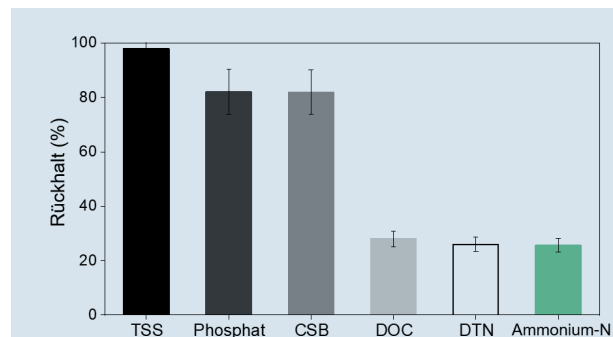
Darüber hinaus verstärkt eine weltweit steigende Nachfrage nach Fleisch den Einsatz von Antibiotika in der Tierhaltung. Anschließend werden 90 % der verabreichten Stoffe über die Gülle ausgeschieden und können in die Gewässer eingetragen werden. In der Tat können überhöhte Einträge von Antibiotika zur Entwicklung anti-

biotikaresistenter Bakterien führen. Antibiotikaresistenzgene (ARG) können auch direkt über die Gülle in die Umwelt eingetragen werden.

Vor diesem Hintergrund bieten Membranverfahren eine gute Alternative für eine weitergehende Behandlung von Schweinegülle. Im Rahmen des Projektes KompaGG-N werden Schweinegülle und Gärreste im Pilotmaßstab mit Mikrofiltration (MF) behandelt und eine Nährstoffrückgewinnung angestrebt. Das Permeat der MF wird zur weiteren Entfernung von Antibiotika und ARG mit Nanofiltrationsmembranen nachbehandelt. Damit können Membranverfahren einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des Eintrags von Antibiotika und ARG in die Umwelt leisten.

Verschiedene Proben flüssiger Schweinegülle wurden im Jahr 2020 von zwei verschiedenen Schweinezuchtbetrieben (Standorte 1 und 2, siehe **Bild 3.4**) in Baden-Württemberg genommen und charakterisiert. Weiterhin wurde eine Gärrestprobe an einem Standort (Standort 3) in Niedersachsen untersucht.

Die erste Filtrationsstufe (MF) wurde sowohl mit keramischen als auch mit polymeren MF-Membranen durchge-



**Bild 3.5:** Rückhalt der 0,2 µm Mikrofiltration bei Schweinegülle (Standort 1). TSS: gesamte suspendierte Feststoffe; CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf; DOC: gelöster organischer Kohlenstoff; DTN: gesamter gelöster Stickstoff.

führt. Die keramische MF-Membran im Pilotmaßstab erreichte eine TSS-Verringerung (Total Suspended Solids: gesamte suspendierte Feststoffe) von mehr als 98 %. Der Phosphatrückhalt lag bei 82 % (Bild 3.5). Die CSB-Reduktion (Chemischer Sauerstoffbedarf) durch die MF betrug ca. 80 %. Frühere Studien ergaben eine ähnliche CSB-Retention während der MF. Die Permeabilität der Membran nahm über die ersten Stunden schnell ab und erreichte ein stabiles Niveau bei ca. 30 L/(m<sup>2</sup> h bar). Der schnelle Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil der zurückgehaltenen Bestandteile die zu Beginn in der Membran vorhandenen freien Poren schnell verblockt, was den Erwartungen entspricht.

In den Proben aus verschiedenen Standorten wurden neben den Antibiotika auch verschiedene ARG nachgewiesen. Insgesamt wurden 67 (Gülle, Standort 1), 63 (Gülle, Standort 2) und 50 (Gärrest, Standort 3, siehe Bild 3.6) verschiedene ARG, die zu acht verschiedenen Antibiotika-Gruppen gehörten, quantifiziert. Die Membran NF270 konnte mehr als 99 % der untersuchten ARG entfernen. Allerdings war der Rückhalt von spezifischen ARG niedriger als erwartet: 6 ARG aus der Aminoglycosid-AB-Gruppe und 4 ARG aus der Tetracyclin-Gruppe wurden mittels der NF270-Membran lediglich zu 95 bis 99 % entfernt und wurden im Permeat nachgewiesen. Selbst wenn der Größenausschluss als der dominierende Mechanismus zur ARG-Entfernung durch NF-Membranen vermutet wird, zeigen die Ergebnisse, dass der Transport von ARG durch NF-Membranen noch nicht vollständig verstanden ist. Ein detaillierter Beitrag zur Behandlung von Gülle mit Membranverfahren wird in energie wasser-praxis, Ausgabe 6+7 (2021), erscheinen.

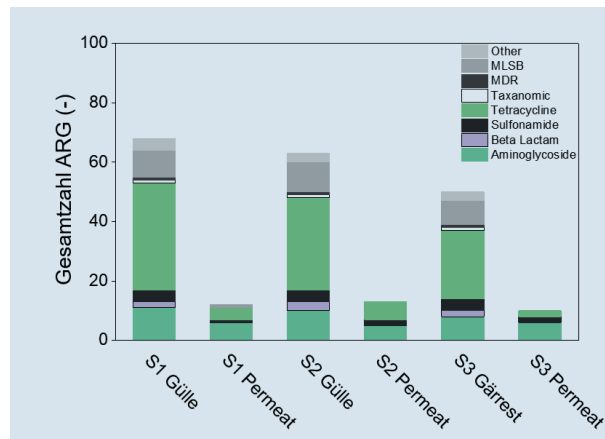
### 3.3 Veröffentlichungen

#### Veröffentlichungen in „peer-reviewed“ Fachjournalen und Buchbeiträge

[2] Ali, R.; Saravia, F.; Hille-Reichel, A.; Härrer, D.; Gescher, J.; Horn, H.: Enhanced production of propionic acid through acidic hydrolysis by choice of inoculum. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, doi:org/10.1002/jctb.6529.

[3] Balbierer, R.; Seegert, P.; Herberger, S.; Wetzels, T.; Nirschl, H.; Guthausen, G.: Investigation of transverse relaxation rate distribution via magnetic resonance imaging: Impact of electrode formation. *Energy Technology* 2000579, 1-8, 2020.

[4] Bogler, A.; Packman, A.; Furman, A.; Gross, A.; Kushmaro, A.; Ronen, A.; Dagot, C.; Hill, C.; Vaizel-Ohayon, D.; Morgenroth, E.; Bertuzzo, E.; Wells, G.; Kiperwas, H.R.; Horn, H.; Negev, I.; Zucker, I.; Bar-Or, I.; Moran-Gilad, J.; Balcazar, J.L.; Bibby, K.; Elimelech, M.; Weisbrod, N.; Nir, O.; Sued, O.; Gillor, O.; Alvarez, P.J.; Crameri, S.; Arnon, S.; Walker, S.; Yaron, S.; Nguyen, T.H.; Berchenko, Y.; Hu, Y.; Ronen, Z.; Bar-Zeev, E.: Rethinking wastewater risks and monitoring in light of the COVID-19 pandemic. *Nature Sustainability*, doi: 10.1038/s41893-020-00605-2, 2020.



**Bild 3.6:** Gesamtzahl von gemessenen ARG in unbehandelte Gülle und Permeat aus der Nanofiltration (NF270). S1: Standort 1; S2: Standort 2; S3: Standort 3.

[5] Brown, P.C.; Borowska, E.; Peschke, R.; Schwartz, T.; Horn, H.: Decay of elevated antibiotic resistance genes in natural river sediments after sedimentation of wastewater particles. *Science of the Total Environment* 705, 135861, 2020.

[6] Fengler, C.; Arens, L.; Horn, H.; Wilhelm, M.: Desalination of seawater using cationic poly(acrylamide) hydrogels and mechanical forces for separation. *Macromolecular Materials and Engineering* 305 (10), 2000383, 2020.

[7] Gierl, L.; Stoy, K.; Faña, A.; Horn, H.; Wagner, M.: An open-source robotic platform that enables automated monitoring of replicate biofilm cultivations using optical coherence tomography. *npj Biofilms and Microbiomes* 6 (1), 18, 2020.

[8] Guo, T.; Ji, Y.; Zhao, J.; Horn, H.; Li, J.: Coupling of Fe-C and aerobic granular sludge to treat refractory wastewater from a membrane manufacturer in a pilot-scale system. *Water Research* 186, 116331, 2020.

[9] Hackbarth, M.; Jung, T.; Reiner, J.E.; Gescher, J.; Horn, H.; Hille-Reichel, A.; Wagner, M.: Monitoring and quantification of bioelectrochemical *Kyrpidia spormannii* biofilm development in a novel flow cell setup. *Chemical Engineering Journal* 390, 124604, 2020.

[10] Ibrahim, M.; Rudzuck, T.; Kerdi, B.; Krämer, S.; Guthausen, G.; Powell, A.K.: Comparative NMR relaxivity study of polyoxometalate-based clusters [Mn<sub>4</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>(P<sub>2</sub>W<sub>15</sub>O<sub>56</sub>)<sub>2</sub>]<sup>16-</sup> and [Dy(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>Mn<sub>4</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>(P<sub>2</sub>W<sub>15</sub>O<sub>56</sub>)<sub>2</sub>]<sup>10-</sup> from 20 MHz to 1.2 GHz. *Applied Magnetic Resonance*, doi: 10.1007/s00723-020-01267-1, 2020.

[11] Kaysan, G.; Spiegel, B.; Guthausen, G.; Kind, M.: Influence of shear flow on the crystallization of organic melt emulsions – A rheo-nuclear magnetic resonance investigation. *Chemical Engineering & Technology* 43 (9), 1699-1705, 2020.

[12] Kieselbach, M.; Hogen, T.; Geißen, S.-U.; Track, T.; Becker, D.; Rapp, H.-J.; Koschikowski, J.; Went, J.; Horn, H.; Saravia, F.; Bauer, A.; Schwantes, R.; Pfeifle, D.; Heyn, N.; Weissroth, M.; Fitzke, B.: Brines from industrial water recycling: new ways to resource recovery. *Journal of Water Reuse and Desalination*. jwrd2020033, 2020.

[13] Klemens, F.; Schuhmann, S.; Balbierer, R.; Guthausen, G.; Nirschl, H.; Thäter, G.; Krause, M.J.: Noise reduction of flow MRI measurements using a lattice Boltzmann based topology optimisation approach. *Computers & Fluids* 197, 104391, 2020.

- [14] Layer, M.; Bock, K.; Ranzinger, F.; Horn, H.; Morgenroth, E.; Derlon, N.: Particulate substrate retention in plug-flow and fully-mixed conditions during operation of aerobic granular sludge systems. *Water Research X* 9, 100075, 2020.
- [15] Liu, W.; Wu, Y.; Zhang, S.; Gao, Y.; Jiang, Y.; Horn, H.; Li, J.: Successful granulation and microbial differentiation of activated sludge in anaerobic/anoxic/aerobic (A<sup>2</sup>O) reactor with two-zone sedimentation tank treating municipal sewage. *Water Research* 178, 115825, 2020.
- [16] Niestroj-Pahl, R.; Stelmaszyk, L.; ElSherbiny, I.M.A.; Abuelgasim, H.; Krug, M.; Staaks, C.; Birkholz, G.; Horn, H.; Li, T.; Dong, B.; Dähne, L.; Tieh, A.; Panglisch, S.: Performance of layer-by-layer-modified Multibore<sup>®</sup> ultrafiltration capillary membranes for salt retention and removal of antibiotic resistance genes. *Membranes* 10, 398, 2020.
- [17] Ranzinger, F.; Hille-Reichel, A.; Zehe, E.; Guthausen, G.; Horn, H.: Quantification of evaporation and drainage processes in unsaturated porous media using Magnetic Resonance Imaging (MRI). *Water Resources Research* 56 (2), e2019WR026658, 2020.
- [18] Ranzinger, F.; Matern, M.; Layer, M.; Guthausen, G.; Wagner, M.; Derlon, N.; Horn, H.: Transport and retention of artificial and real wastewater particles inside a bed of settled aerobic granular sludge assessed applying magnetic resonance imaging. *Water Research X* 7, 100050, 2020.
- [19] Reiner, J.E.; Geiger, K.; Hackbarth, M.; Fink, M.; Lapp, C.J.; Jung, T.; Dötsch, A.; Hügler, M.; Wagner, M.; Hille-Reichel, A.; Wilcke, W.; Kerzenmacher, S.; Horn, H.; Gescher, J.: From an extremophilic community to an electroautotrophic production strain: identifying a novel Knallgas bacterium as cathodic biofilm biocatalyst. *The ISME Journal* 14, 1125-1140, 2020.
- [20] Ruffer, H.; Karger, R.; Telgmann, U.; Horn, H.: Kapitel 13: Abwasserreinigung. In: Wasser, Höll, K.; Nießner, R. (Eds.), 989-1084, De Gruyter, Berlin, Boston, 2020.
- [21] Schopf, R.; Schork, N.; Amling, E.; Nirschl, H.; Guthausen, G.; Kulozik, U.: Structural characterisation of deposit layer during milk protein microfiltration by means of in-situ MRI and compositional analysis. *Membranes* 10 (4), 59, 2020.
- [22] Simkins, J.W.; Schuhmann, S.; Guthausen, G.; Heijnen, M.; Codd, S.L.; Seymour, J.D.: Characterization of biofilm distribution in hollow fiber membranes using compressed sensing magnetic resonance imaging. *Journal of Membrane Science* 594, 117437, 2020.
- [23] Sturm, M.T.; Herbort, A.F.; Horn, H.; Schuhen, K.: Comparative study of the influence of linear and branched alkyltrichlorosilanes on the removal efficiency of polyethylene and polypropylene-based microplastic particles from water. *Environmental Science and Pollution Research* 27, 10888–10898, 2020.
- [24] Telgmann, U.; Borowska, E.; Felmeden, J.; Frechen, F.-B.: The locally resolved filtration process for removal of phosphorus and micropollutants with GAC. *Journal of Water Process Engineering* 35, 101236, 2020.
- [25] Timm, A.; Abendschön, P.; Tölgyesi, L.; Horn, H.; Borowska, E.: Solar-mediated degradation of linezolid and tedizolid under simulated environmental conditions: Kinetics, transformation and toxicity. *Chemosphere* 241, 125111, 2020.
- [26] Tosun, J.; Scherer, U.; Schaub, S.; Horn, H.: Making Europe go from bottles to the tap: Political and societal attempts to induce behavioral change. *WIREs Water* 7 (3), e1435, 2020.
- [27] Xiao, K.; Abbt-Braun, G.; Horn, H.: Changes in the characteristics of dissolved organic matter during sludge treatment: A critical review. *Water Research* 187, 116441, 2020.

#### 4. TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

##### Josef Klinger

Am TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser stehen der nachhaltige Schutz der Wasserressourcen und innovative Lösungen für die Trinkwasserversorgung und die Industrie- und Abwassernutzung im Mittelpunkt aller Aktivitäten. Im Verbund mit international führenden Instituten der Wasserforschung versteht sich das TZW als treibende Kraft bei der Entwicklung tragfähiger Konzepte für die Zukunft der Wasserversorgung. Seine Kompetenz stützt sich auf die Ergebnisse von rund 50 Forschungsprojekten, die pro Jahr von nationalen oder internationalen Fördermittelgebern finanziert werden.

Die über 1.000 Kunden des TZW sind Wasserversorger, Industrieunternehmen, Fachbehörden und Hochschulen. Für sie entwickelt es in einem engen Zusammenspiel von Wissenschaft und Praxis neue und zukunftsfähige Konzepte. Die interdisziplinären Teams setzen sich aus Expertinnen und Experten aus den Bereichen Wasserversorgung, Wassermikrobiologie, Wasserchemie, Wasserverteilung und der Prüfstelle Wasser zusammen. Rund 180 hochqualifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus den Fachberei-

chen Chemie, Biologie, Physik, Umweltwissenschaften, Verfahrenstechnik, Materialwissenschaft sowie Geistes- und Sozialwissenschaften arbeiten in der anwendungsnahen Forschung sowie der wissenschaftlichen Beratung.

Das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser ist eine organisatorisch und haushaltstechnisch eigenständige, gemeinnützige Einrichtung des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs (DVGW). Das jährliche Budget von rund 18 Mio. Euro setzt sich vor allem aus technisch-wissenschaftlichen Studien, praxisnahen Forschungsaufträgen und geförderten Forschungsprojekten zusammen.

Der Jahresbericht gibt einen thematisch gegliederten Überblick über die wesentlichen Arbeitsschwerpunkte des TZW im Jahr 2020.

##### Wasseranalytik

Im Jahr 2020 wurden im Labor des TZW über 21.000 Proben untersucht, mehr als jemals zuvor (**Bild 4.1**). Den wesentlichen Schwerpunkt bildete die Untersuchung von Wasserproben auf eine Vielzahl an **chemisch-physikali-**

**schen und mikrobiologischen Parametern.** Auftraggeber waren wie in den Vorjahren vor allem Wasserversorger und Behörden, aber zunehmend auch Kläranlagenbetreiber und Industrieunternehmen. Im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben, die am TZW oder auch bei anderen Forschungseinrichtungen bearbeitet wurden, fielen ebenfalls zahlreiche Analysen an. Untersuchungsgegenstand waren vor allem Roh- und Trinkwasser, aber auch kommunale und industrielle Abwässer nahmen einen großen Raum ein. Darüber hinaus wurden feste Matrices wie Boden oder Klärschlamm analysiert. Sonderproben wie Feuerlöschschäume oder diverse Biota stellten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vor neue Herausforderungen. Im Bereich der chemischen Analytik war auch 2020 neben der Bestimmung wasserchemischer Basisparameter die **Analytik von organischen Spurenstoffen** die zentrale Kernkompetenz des TZW. Wichtige Parameter waren weiterhin per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), Arzneimittelrückstände, PSM-Metabolite und Einzelstoffe wie Trifluoracetat, 1,4-Dioxan, Amidosulfonat oder 1H-1,2,4-Triazol. Die Bestimmung von organischen Phosphonaten, die als Antiscalants in Membrananlagen eingesetzt werden, und von Microcystinen, die als Folge des Klimawandels Talsperrenbetreiber zunehmend vor Probleme stellen, erweiterte das Leistungsspektrum des TZW. Aufgrund des weiterhin hohen Interesses erfolgten auch 2020 zahlreiche Analysen unterschiedlicher Wässer auf **Mikroplastikpartikel**.

In der **mikrobiologischen Analytik** wurden Trinkwasserproben nach den Anforderungen der Trinkwasserverordnung untersucht. Dies umfasste sowohl Wasserproben der öffentlichen Wasserversorgung als auch zunehmend Wasserproben aus der Trinkwasser-Installation. Dort spielten insbesondere die Krankheitserreger *Legionella spec.* und *Pseudomonas aeruginosa* eine wichtige Rolle. Für Rohwasserproben fragten die Kunden auch weitergehende Untersuchungen nach. Dies beinhaltet neben den klassischen bakteriologischen Indikatorparametern zunehmend virale Indikatorparameter (Bakteriophagen). Auch die direkte Untersuchung auf Krankheitserreger, wie Campylobacter, humanpathogene Viren und Parasiten, erfolgte in den TZW-Laboren. Erneut bestätigte die erfolgreiche Teilnahme an zahlreichen Ringversuchen und Vergleichsuntersuchungen die hohe Qualität der analytischen Arbeiten.

### Spurenstoffe

Das Wissen zum Umweltverhalten und zur Toxizität von **per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS)** nimmt ständig zu. Daher ist diese Stoffgruppe nach wie vor eine der meist diskutierten im Bereich der Spurenstoffanalytik. PFAS waren in der bisherigen Trinkwasserverordnung (TrinkwV) nicht über Grenzwerte geregelt. In der revidierten EG-Trinkwasserrichtlinie (EU-TWRL) sind PFAS erstmals mit einem Summengrenzwert (Summe der PFAS) von 0,1 µg/L für eine Auswahl von 20 Substanzen aufgeführt.



**Bild 4.1** In den Laboren des TZW wurden im Jahr 2020 mehr Proben analysiert als je zuvor.



**Bild 4.2:** Sedimentprobenahme zur Analyse auf organische Phosphonate.

Die Einzelverbindungen umspannen PFAS mit Kettenlängen von C4 bis C13. Erst seit Ende 2020 sind für zwei der langkettigen Sulfonsäuren analytische Standards verfügbar, die erfolgreich in die Methoden am TZW integriert wurden. Zusätzlich wurde ein PFAS-Summenparameter (PFAS gesamt) von 0,5 µg/L für die Summe aller PFAS eingeführt. Dieser Parameter umfasst die Gesamtheit aller PFAS. Er soll allerdings erst zur Anwendung kommen, wenn technische Regeln für die Überwachung des Para-



**Bild 4.3:** Agardiffusionstest zur Erfassung von Multiresistenzen.

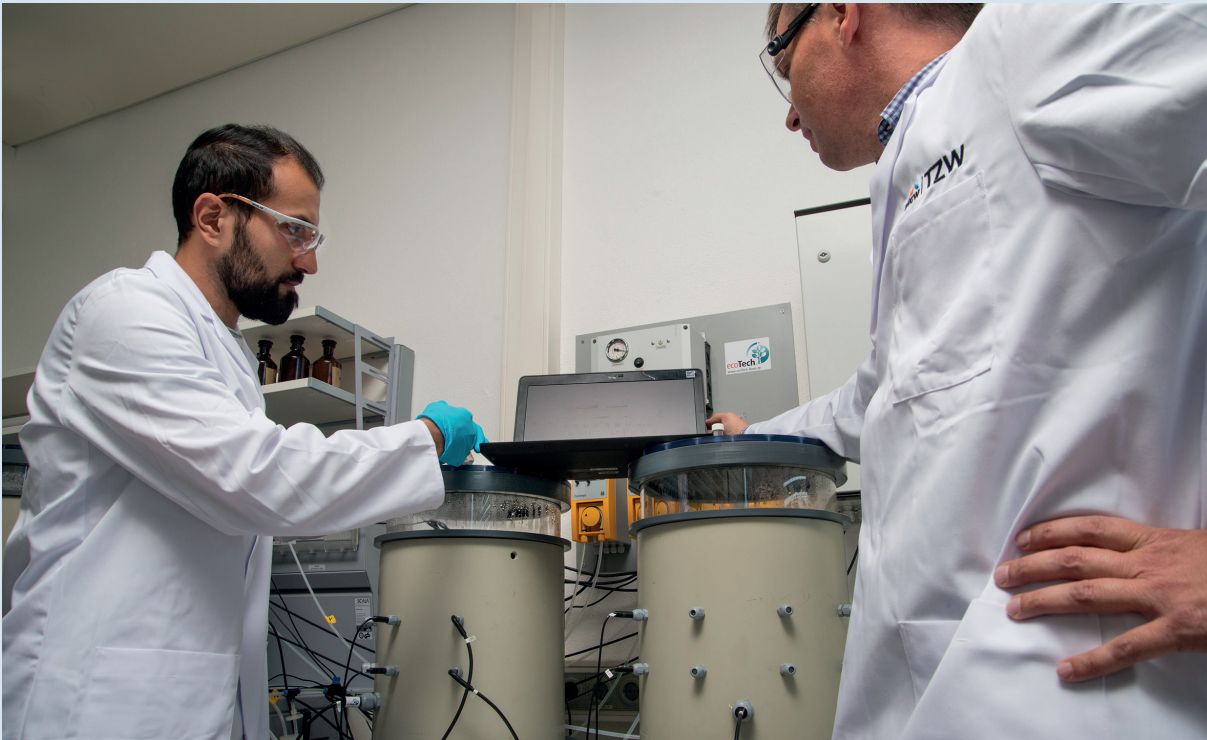
eters entwickelt sind. Prinzipiell sind hierfür die am TZW etablierten Summenparameter EOF, AOF oder der Total Oxidizable Precursor-Assay (TOP-Assay) geeignet, die im Jahr 2020 weiter optimiert werden konnten.

Die Bedeutung von **Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren** zur Verringerung von Stickstoffverlusten in der Landwirtschaft steigt weiter. Daher ist von einem zunehmenden Einsatz dieser Stoffe auszugehen. Wasserversorgungsunternehmen sind besorgt, dass es dadurch zu einem Eintrag der Verbindungen in das Grundwasser kommen könnte. Das TZW bietet seit Jahren eine analytische Methode für den Nachweis einer Vielzahl dieser Verbindungen in Wasserproben an. Die Methode konnte nun erfolgreich auf die Analyse von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren in Bodenproben erweitert werden. Das Verfahren wird derzeit in einem DVGW-Forschungsvorhaben zum Abbau- und Verlagerungsverhalten der Substanzen eingesetzt.

Organische **Phosphonate** werden verstärkt als Enthärtungsmittel in Wasch-, Pflege- und Reinigungsmitteln sowie bei industriellen Prozessen eingesetzt. Sie dienen außerdem als Antiscalants bei der Aufbereitung von Trinkwasser mittels Filtration über dichte Membranen. Aufgrund starker Adsorption an mineralischen Oberflächen können sich Rückstände der biologisch schwer abbaubaren Stoffe in Gewässersedimenten anreichern (**Bild 4.2**). Durch die Entwicklung von Analyseverfahren, die sich zur Spurenanalytik von Phosphonaten aus diversen Matrices eignen, wurde eine Grundlage zur Bilanzierung des Phosphonateintrags in die Umwelt und im Prozess der Membranfiltration geschaffen. Um die Analytik der Komplexbildner zu komplementieren, werden gegenwärtig analytische Methoden zur Quantifizierung von **Acrylsäurepolymeren** entwickelt, die gleichfalls als Antiscalants eingesetzt werden.

### Mikroorganismen

Viele Wasserversorgungsunternehmen haben sich auch im Jahr 2020 an das TZW gewandt, um den **Ursachen für hygienisch-mikrobiologische Befunde** bei der Wassergewinnung, im Wasserwerk, in Behältern oder im Leitungsnetz auf den Grund zu gehen. Nach wie vor hat auch die **Aufstellung von Handlungsplänen** bei Wasserversorgungsunternehmen ohne Abschlussdesinfektion mit Chlor oder Chlordioxid eine große Bedeutung. Diese dienen dazu, dass auch im Notfall bei mikrobiologischen Grenzwertüberschreitungen schnell reagiert werden kann. Dazu gehört auch die Unterstützung von Wasserversorgern bei der Festlegung sinnvoller Probenahmestellen im Verteilungsnetz und zur Erarbeitung eines Notfalldesinfektionskonzeptes. Bei der Aufstellung von Handlungsplänen wird außerdem durch AOC-Messungen geprüft, ob durch die kurzfristige Notfalldesinfektion eine



**Bild 4.4:** Die Bodenlysimeter werden im Labor beregnet und das Sickerwasser untersucht.

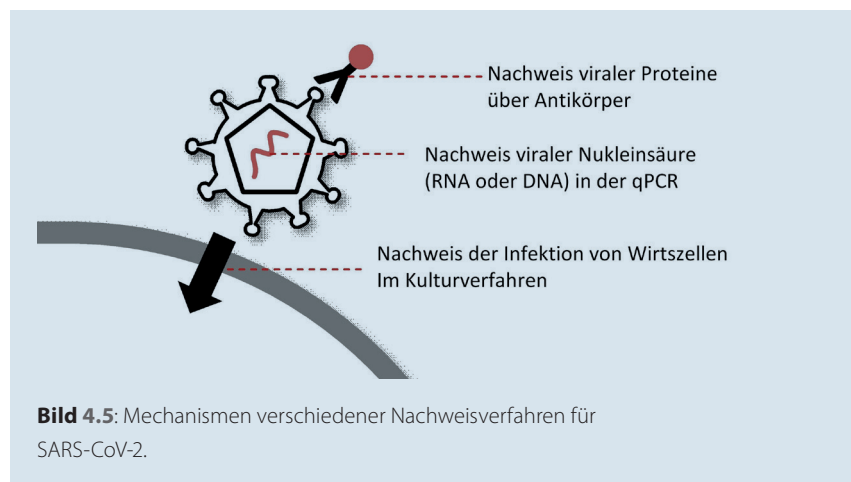
Erhöhung des Wiederverkeimungspotenzials im Trinkwasser auftreten kann.

Mit der MALDI-TOF-Massenspektrometrie steht am TZW eine zukunftssträchtige molekularbiologische Methodik zur **Identifizierung von Bakterien** zur Verfügung. In einigen Fällen gelang es, durch die schnelle Identifizierung der auftretenden Stämme coliformer Bakterien oder Enterokokken ein Abkochgebot für das Trinkwasser zu vermeiden. Im Falle von vereinzelt Nachweisen hygienisch-relevanter Mikroorganismen in Trinkwassersystemen war die Untersuchung von angereicherten Wasserproben nach Anreicherung großer Volumina (100 L) über Ultrafiltrationsmodule für die Suche der Belastungsursache hilfreich. Zur Prüfung der Aufbereitungswirksamkeit wurden auch Volumina bis ca. 1.000 L untersucht.

Zur **Bewertung der mikrobiologischen Rohwasserbeschaffenheit** wurden Rohwasserproben zusätzlich zu den klassischen bakteriologischen Parametern auch auf virale Indikatoren (Bakteriophagen) und die Index-Pathogene *Campylobacter*, Viren und Parasiten untersucht. Der Virennachweis (Adeno-, Entero-, Noroviren) erfolgte dabei nach Ultrafiltrationsanreicherung aus 10 L-Proben durch eine molekularbiologische quantitative PCR-Methodik, für deren Wiederfindung nahezu 100 % erreicht werden konnten. Die Erkenntnisse wurden im Rahmen eines DVGW-Projektes zur quantitativen mikrobiellen Risikobewertung zusammengefasst. Auch im Jahr 2020 wur-

den Problemstellungen im Bereich der Trinkwasser-Installation bearbeitet, die die Krankheitserreger *Pseudomonas aeruginosa* und Legionellen umfassten.

Anfragen zum **Vorkommen von Antibiotikaresistenzen** im Trinkwasser konnten sowohl durch den kulturellen Nachweis von antibiotikaresistenten Bakterien als auch den molekularbiologischen Nachweis von Antibiotikaresistenzgenen beantwortet werden, wobei im Trinkwasser keine Nachweise erfolgten. Für den Nachweis von Bakterien mit Antibiotikaresistenzen wurden neue Kulturverfahren und molekularbiologische Metho-



**Bild 4.5:** Mechanismen verschiedener Nachweisverfahren für SARS-CoV-2.

den eingesetzt (**Bild 4.3**). Die Methoden aus dem klinischen Bereich sind nicht auf Umweltproben anwendbar. Daher erfolgte eine Anpassung, um eine spezifische Überwachung des aquatischen Bereichs zu ermöglichen. Dafür wurden angepasste Medien für die Kultivierung und Enzymtests entwickelt. Die Arbeiten dienen dem fundierten Monitoring des Vorkommens von Antibiotikaresistenzen.

**Ressourcenschutz**

Die **Grundwasserdatenbank Wasserversorgung Baden-Württemberg** (GWD-WV) erfasst landesweit Daten zur Beschaffenheit der Grund- und Quellwasservorkommen, die von Wasserversorgungsunternehmen zur Trinkwasserversorgung genutzt werden. Das TZW betreibt die Datenbank, aktualisiert laufend insbesondere die Daten zur Nitratbelastung der Rohwässer und leitet sie an die zuständigen Behörden weiter. Hier bilden die übermittelten Werte die Basis für die Einstufung der Wasserschutzgebiete in Normal-, Problem- oder Sanierungsgebiete nach der Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung (SchALVO). Dabei kooperiert die GWD-WV der Wasserversorger eng mit der durch die LUBW betriebenen Grundwasserdatenbank (GWDB) des Landes Baden-Württemberg.

Durch **problem- und gebietspezifische Monitoringprogramme** und Ortsbegehungen werden Belastungen des Grundwassers mit Nitrat, PFAS, Pflanzenschutzmittelwirkstoffen und deren Abbauprodukten erkundet sowie durch Bodenuntersuchungen die Nitrat- auswaschungsverluste abgeschätzt. Diese Arbeiten dienen dazu, Handlungsempfehlungen zur Ursachenbeseitigung von Grundwasserunreinigungen oder zum Umgang mit Belastungen abzuleiten. Diese Ergebnisse

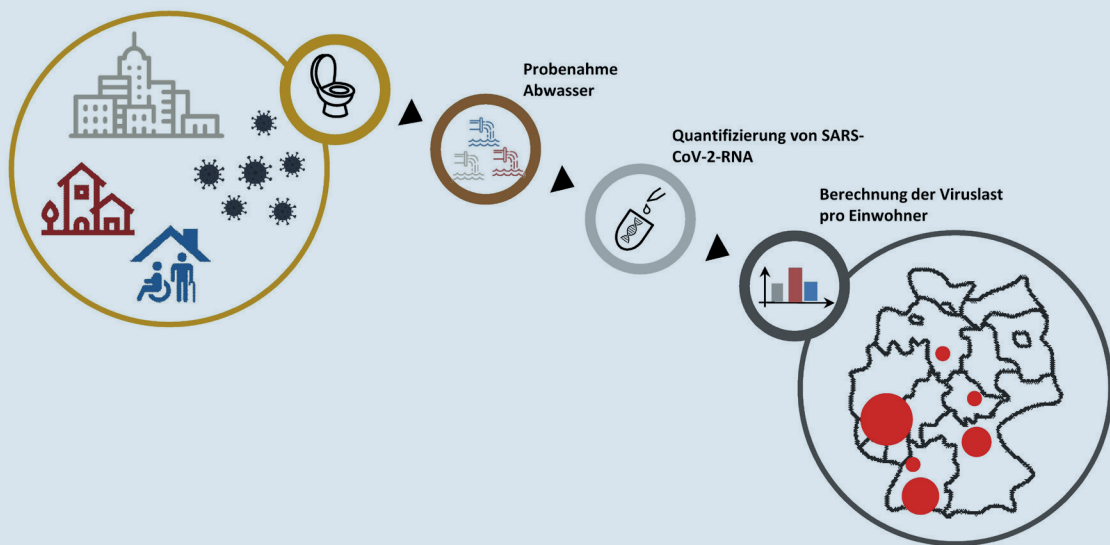
können auch als Basis für eine Messnetzoptimierung dienen. Neben Geografischen Informationssystemen (GIS) werden auch numerische Grundwassersimulationen herangezogen.

Das TZW begleitet Wasserversorgungsunternehmen bei der **Einführung von Risikomanagementsystemen** gemäß DIN EN 15975-2 bzw. dem neuen DVGW-Merkblatt W 1001 und setzt dabei auch die am TZW entwickelten GIS-basierten Ansätze zur Risikoabschätzung für Einzugsgebiete ein. Eine komplexe Aufgabenstellung war hier die Umsetzung bei einem großen Talsperrenbetreiber auf ein Talsperren-Verbundsystem.

Gemeinsam mit dem IWW und der Iföl GmbH untersucht das TZW im DVGW-Forschungsprojekt „INHIBIT“ die **Auswirkungen von Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren** auf das Grundwasser. Neben Literaturstudien werden am TZW Versuche unter Labor- sowie natürlichen Bedingungen durchgeführt (**Bild 4.4**). Dabei werden ausgewählte Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren auf Labor- und Freilandlysimeter aufgegeben und im Sickerwasser analysiert. Die Ergebnisse sollen Aufschluss darüber geben, ob und wie die Inhibitoren mit dem Sickerwasser verlagert werden.

**Umweltbiotechnologie**

Die Schwerpunkte lagen auf dem natürlichen und stimulierten Abbau von organischen und anorganischen Schadstoffen, der Entwicklung neuer Methoden zum Nachweis von Antibiotikaresistenzen in der Umwelt sowie der Entwicklung neuer molekularbiologischer Methoden für den Nachweis von SARS-CoV-2 in Abwasser. Der **mikrobiologische Abbau von Trichlorethen** unter aeroben Bedingungen ohne zusätzliche Auxiliarsubstrate wurde erstmals am TZW nachgewiesen und wird intensiv



**Bild 4.6:** Das Prinzip der abwasserbasierten Epidemiologie, die als Frühwarnsystem dienen kann.



untersucht. Dieser neue Abbauweg hat deutliche Vorteile gegenüber dem co-metabolischen Abbau, da mit wenig Sauerstoff ein guter Abbaugrad der chlorierten Schadstoffe möglich ist. Nachdem die Praxistauglichkeit bereits im Feld demonstriert wurde, konnte in mehreren Versuchsreihen gezeigt werden, dass dieser neue Abbauweg durch Animpfung mit zuvor angereicherten Kulturen auch in Grundwasser von anderen kontaminierten Standorten genutzt werden kann.

Auf Basis von Laborversuchen wurde ein Feldversuch zur **Elimination von Nitrat aus Grundwasser** mittels mikrobieller Denitrifikation gestartet. Der Prozess wird mittels innovativer molekularbiologischer Methoden überwacht, bei denen die mRNA spezifisch nachgewiesen wird. Auf diese Weise können die aktiven Zonen in hoher Auflösung erfasst und der Prozess gezielt gesteuert werden.

Des Weiteren wurde der **Abbau von Diphyl-Öl** sowohl durch chemische Oxidation als auch durch mikrobiologische Stimulation gezeigt. Die Entwicklung fokussierte zunächst auf die Sanierung von Schadstoffen, die gelöst im Grundwasser vorliegen. Aufgrund der positiven Ergebnisse wird das Kombinationsverfahren für die Sanierung hochkonzentrierter Schadstoffpools weiterentwickelt. Das Konzept ermöglicht die Sanierung bei deutlicher Kostenreduktion im Vergleich zu konventionellen Verfahren.

Ein weiterer fachlicher Schwerpunkt liegt auf der **Entwicklung neuer molekularbiologischer Verfahren für den Nachweis von Coronaviren**. Die digitale Droplet-PCR konnte für den Nachweis von SARS-CoV-2 mit hoher Empfindlichkeit in Abwasser genutzt werden und trägt zum Verständnis des Infektionsgeschehens in der Corona-Pandemie bei (Bild 4.5).

### Abwasser und Wasserkreislauf

Als neues Forschungsthema wurde am TZW der **Nachweis von SARS-CoV-2-Biomarkern im Abwasser** etabliert (Bild 4.6, Bild 4.7). Die quantitative Erfassung der RNA trägt im Rahmen der abwasserbasierten Epidemiologie zum Verständnis des Infektionsgeschehens bei. Für die Analytik werden Proben aus dem Zulauf von Kläranlagen oder der Kanalisation entnommen. Nach Extraktion der Nucleinsäuren erfolgt die quantitative Messung mit Hilfe von digitaler Droplet-PCR (ddPCR). Die Messung der spezifischen Anzahl der Genfragmente von SARS-CoV-2 erlaubt die Beurteilung der Zunahme oder Abnahme der Infektionen im Einzugsgebiet. So können frühzeitig Trends erkannt und der Erfolg von Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie beurteilt werden. Außerdem können bei Positivbefunden im Abwasser gezielte Tests an möglichen Hotspots durchgeführt werden. Nach erfolgreicher Etablierung der neuen Methodik werden die Ergebnisse zunehmend durch lokale Krisenstäbe genutzt. Eine umfangreiche **Literaturstudie zur Relevanz von SARS-CoV-2 für Trinkwasser** wurde bereits frühzeitig in



Bild 4.7: Proben aus einem Kläranlagenzulauf.

einem DVGW-Projekt am TZW angefertigt. Coronaviren gehören zu den behüllten Viren, deren Infektiosität von der Intaktheit ihrer empfindlichen äußeren Membran abhängt. Aufgrund der Trinkwasseraufbereitung und des etablierten Schutzes der Rohwässer ist eine Verbreitung über das Trinkwasser höchst unwahrscheinlich. Zusätzlich wurde ein Monitoringkonzept für unbehüllte und behüllte Viren entwickelt.

Im Rahmen des vom Umweltbundesamt geförderten Projekts **Phosphonate in Wasch- und Reinigungsmitteln und deren Verbleib in der Umwelt** mit dem ISWA Stuttgart wurde unter anderem der Verbleib von organischen Phosphonaten bei der kommunalen Abwasserbehandlung untersucht. Hierbei wurden signifikante Eliminierungsraten zwischen 80 und 90 % nach der zweiten Behandlungsstufe festgestellt. Im Kläranlagenzulauf lagen bis zu 70 % des Gesamtphosphonats adsorbiert an die Feststoffphase vor. Im Hinblick auf die geringe biologische Abbaubarkeit wird die hohe Eliminierung vor allem auf die Adsorption an Belebtschlamm zurückgeführt. Die fünf am häufigsten in Wasch-, Pflege- und Reinigungsmitteln eingesetzten Phosphonate trugen in den untersuchten Kläranlagen über alle Behandlungsstufen mit 10 bis 25 % zur Fraktion an gelöstem unreaktiven Phosphor (GUP) bei. Zukünftige Forschung soll weitere Erkenntnisse über die biologische Transformation unter speziellen Bedingungen und mögliche Abbauprodukte liefern.

### Neue Technologien und Produkte

Das TZW konnte im Jahr 2020 mehrere **Pilotanlagen für Aufbereitungsverfahren und Technologiekonzepte** erfolgreich aufbauen und betreiben. Damit lassen sich beim Neubau oder der Modernisierung von Wasserwerken konkrete und fundierte Aussagen zur Anlagendimen-

sionierung und zum Anlagenbetrieb treffen. Hierbei wurden Ultrafiltrations-, Umkehrosiose- und andere Enthärtungsanlagen sowie mehrstufige Pilotanlagen, z. B. zur Aufbereitung von Talsperrenwasser, eingesetzt. Die **Behandlung von salzhaltigem Retentat** aus Umkehrosioseanlagen mit Kornaktivkohle wurde ebenfalls im Pilotmaßstab untersucht.

Auch bei der **Optimierung von Aufbereitungsstufen** in Wasserwerken war das TZW im Auftrag von Kunden tätig (**Bild 4.8**). So wurde die Leistungsfähigkeit einer älteren Ultrafiltrationsanlage, die aufgrund einer geänderten Rohwasserbeschaffenheit zeitweise stark eingetrübtes Wasser aufbereitete, überprüft und der Betrieb angepasst. Grundlage war die Bestimmung des Potenzials der genutzten Rohwässer für Membranfouling. Bei mehreren Wasserversorgern wurde die Aufbereitungstechnik einer Bestandsaufnahme unterzogen, hinsichtlich Aufbereitungserfordernis und Aufbereitungswirksamkeit überprüft und Anpassungen vorgeschlagen.

Aktiv war das TZW in die Erstellung von **Struktur- und Versorgungskonzepten** sowie von technischen Studien zur Trinkwasseraufbereitung eingebunden. Eine besondere Studie beschäftigte sich mit den Auswirkungen der

neuen EU-Grenzwerte für PFAS im Trinkwasser auf den Betrieb und die Laufzeiten von Aktivkohlefilteranlagen.

Vor dem Hintergrund des **Klimawandels** kommt es zu höheren Temperaturen in Oberflächengewässern und die Gefahr des Algenwachstums steigt. Hierfür werden in einigen Seen schwimmende Flotationsanlagen betrieben, um den Nährstoffgehalt des Wassers zu verringern. Die Auswirkungen auf die Wasserbeschaffenheit eines Sees wurde vom TZW durch räumlich aufgelöste Probenahmen und entsprechende Analytik überprüft und bewertet.

Im Bereich der **Prüfung und Überwachung von Materialien in Kontakt mit Trinkwasser** war das Jahr 2020 aufgrund der neuen KTW-Bewertungsgrundlage geprägt von Abstimmungen mit den Zertifizierern und anderen Prüfinstituten. Zudem war die Kommunikation mit den Kunden von enormer Bedeutung, um die geänderten Regularien zu erläutern und sie bei der Vorbereitung auf die Prüfungen und die Zertifizierung zu beraten.

Wegen der Corona-Pandemie wurde vom Umweltbundesamt im Sommer eine Übergangsregelung geschaffen, um Hygienezertifizierungen im Rahmen der **KTW-Bewertungsgrundlage** nach dem 1+-System auch ohne Erstinspektionen zu ermöglichen. Daraus resultierten ei-



**Bild 4.8:** Um technische Lösungen für die Entfernung von Vanadium aus dem Trinkwasser zu entwickeln, wurden in Zusammenarbeit mit einem Wasserversorger in Rheinland-Pfalz halbtechnische Untersuchungen zur Adsorptions- und Flockungsfiltration durchgeführt.

ne Vielzahl an Kundenanfragen, gerade im Bereich der Rezepturprüfung. Durch die enge Zusammenarbeit mit der DVGW Cert GmbH ergaben sich Vorteile durch kurze Kommunikationswege. Im Rahmen von Hygienezertifizierungen waren die Kollegen der Prüfstelle Wasser am TZW im Auftrag der DVGW Cert als Inspektoren unterwegs und führten Erstinspektionen bei Kunden durch. Aufgrund der Corona-Pandemie beschränkten sich diese allerdings größtenteils auf den deutschsprachigen Raum und den Sommer 2020.

Die Corona-Pandemie hatte auch einen starken Einfluss auf den Bereich der **Produktüberwachung (Bild 4.9)**. Die meisten Produktüberwachungen wurden deshalb nicht als Vor-Ort-Termin, sondern als Remote-Audit durchgeführt. Durch Webmeetings war der Kontakt zu den Kunden aber ebenso intensiv wie in den Vorjahren.

Die Prüfstelle Wasser war in zahlreichen Normungs- und Beratungsgremien des CEN, DIN und des UBA vertreten. Die Prüfstelle Wasser bestand im Januar 2020 im Rahmen der Akkreditierung nach DIN EN 17025 erfolgreich das Überwachungsaudit.

Nach intensiver Mitarbeit des TZW an der Harmonisierung der deutschen und österreichischen **Regelwerke zur Prüfung von UV-Desinfektionsgeräten** wurden in 2020 die DIN 19294-1 und ÖNORM M 5873-1 „Anlagen zur Desinfektion von Wasser mittels Ultraviolett-Strahlen – Anforderungen und Prüfung – Anlagen mit Quecksilberdampf-Niederdruckstrahlern“ wortgleich veröffentlicht. Zeitgleich erschienen die DIN 19294-3 sowie die ÖNORM M 5978-3, in denen die Anforderungen und Prüfung von Referenzradiometern festgelegt sind. Die Prüfstelle Wasser am TZW ist für die genannten Normen bereits akkreditiert und hat darüber hinaus die Prüfung nach dem US-amerikanischen UV Disinfection Guidance Manual in ihren Scope aufgenommen. Die vorhandene technische Ausrüstung, bestehend aus UV-Laborbestrahlungsanlagen zur Aufnahme von Dosis-Wirkbeziehungen (Niederdruck, Mitteldruck und diverse LED-Einzelwellenlängen) und Prüfständen für die biodosimetrische Prüfung von UV-Geräten, wurde dem erweiterten Prüfumfang entsprechend um Prüfstände zur Charakterisierung von UV-Lampen und UV-Sensoren ergänzt.

### Asset-Management und Infrastruktur

Der Schwerpunkt der Arbeiten für Wasserversorgungsunternehmen lag auch im Jahr 2020 auf der **Erarbeitung zustandsorientierter Spülpläne**. Die Strategie der zustandsorientierten Netzspülung wurde in das DVGW-Regelwerk W291 übernommen, von dem zum Ende des Jahres der Gelbdruck vorlag. Darüber hinaus wurden Unternehmen bei der Außerbetriebnahme der Phosphatierung des Trinkwassers unterstützt, wobei unter anderem im Netz Untersuchungen mit kontinuierlichen Trübungsmessungen zur Erfassung der Korrosionsgeschwindigkeit des Leitungsmaterials durchgeführt wurden.

Zum Themenbereich Wasserverluste wurden am TZW entwickelte **Algorithmen zur Identifizierung und Bilanzierung von Leckagen** bei Wasserversorgern erfolgreich eingesetzt. Darüber hinaus wurden Wasserversorger in zahlreichen Fällen zur Identifikation von Eintragswegen und der Entwicklung von Vermeidungsstrategien bei aufgetretenen mikrobiologischen Güteproblemen unterstützt. Hierbei zeigte sich, dass eine systematische Spülung in Verbindung mit der mikrobiologischen Untersuchung des Spülwassers einen Ansatz für die punktgenaue Identifizierung von systeminternen Kontaminationsquellen darstellt.

Im Rahmen der Wasseraufbereitung lag der Schwerpunkt auf der **Durchführung von Funktionsprüfungen**, unter anderem unter dem Aspekt des Wachstums von Invertebraten in der Aufbereitungsanlage und im nachgelagerten Verteilungssystem sowie des Einsatzes spezifisch entwickelter Algorithmen zur Identifikation auffälliger Muster in den Zeitreihen der Aufbereitungsparameter.

Im DVGW-Projekt „**Erhöhte Wassertemperaturen**“ wird in einer Modellstudie der Einfluss unterschiedlicher natürlicher und anthropogener Wärmequellen auf die Temperaturerhöhung der oberen Bodenzone sowie der darin verlegten Trinkwasserleitungen und des darüber verteilten Trinkwassers untersucht. Ziele des Projektes sind einfache Bewertungsverfahren, um Bereiche mit dem Risiko einer erhöhten Trinkwassertemperatur zu identifizieren und um Maßnahmen zur Stabilisierung der Temperaturen in den Leitungsnetzen auszuwählen.

Im Jahr 2020 wurde das vom DVGW geförderte Forschungsvorhaben „**Stand und Perspektiven zum Einsatz von Algorithmen und Modellen zur Kurzzeitprognose für den Wasserbedarf**“ erfolgreich abgeschlossen.



**Bild 4.9:** Im Labor der Prüfstelle werden Materialien im Kontakt mit Trinkwasser geprüft, hier Dichtungen (Elastomeren) mit einer Soxhlet-Apparatur.



**Bild 4.10:** Im Oktober 2020 wurde in Karlsruhe der Förderbescheid für das Projekt Nitrat-Monitoring an die Projektpartner überreicht. Das BMU-Projekt zielt darauf, mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz Nitrat im Grundwasser zu reduzieren.

Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich mit der Identifikation potenzieller Anwendungsfelder von Kurzzeitprognosen und bewertete die Anwendung dieser Verfahren an realen Wasserversorgungssystemen. Gestartet ist das vom Bundesministerium für Umwelt (BMU) geförderte Vorhaben „**Nitrat-Monitoring 4.0** – Intelligente Systeme zur nachhaltigen Reduzierung von Nitrat im Grundwasser (NiMo 4.0)“, bei dem das TZW Teil des Forschungsverbundes ist (**Bild 4.10**), sowie das „Teilprojekt Desinfektionskonzept für Uferfiltration und Ausbau des deutsch-indischen Kompetenzzentrums Uferfiltration“.

### Sicherheit, Digitalisierung und Management

Innovative technische Lösungen vom nationalen und internationalen Wassermarkt für Wasserversorgungsunternehmen aufzuspüren, ist Gegenstand des laufenden DVGW-Verbundforschungsvorhabens SCOUT. Gleichzeitig werden damit die Schwerpunkte der Roadmap „DVGW-Forschungsstrategie Wasser“ regelmäßig aktualisiert. Darüber hinaus soll eine Plattform etabliert werden, die dem konkreten fachlichen Austausch von Wasserversorgern über die Umsetzung von Neuentwicklungen in die Wasserwerkspraxis dient. Dazu wurden in Abstimmung mit Wasserversorgungsunternehmen und DVGW-Forschungsbeirat die Suchfelder für das **Innovationsscouting** auf die Gebiete Inspektionsverfahren, Reststoffe und Online-Sensoren für mikrobiologische

Parameter priorisiert. Für diese Suchfelder werden im weiteren Projektverlauf innovative technische Lösungen als Anregung für die Umsetzung in der Praxis identifiziert.

„Digitalisierung von Wasserversorgern für Wasserversorger“ lautet der Leitgedanke für das im Jahr 2020 neu gestartete **DVGW-Verbundforschungsprojekt „TRINK-Help-DESK“** mit fünf Projektpartnern. Dieses Projekt wird von 14 Wasserversorgungsunternehmen durch Crowdfunding finanziert, die das Projekt durch Mitgliedschaft im Lenkungskreis gleichzeitig inhaltlich begleiten. Ziel ist die Erstellung einer Machbarkeitsstudie für eine mögliche künftige Cloud-Lösung mit wissenschaftlich-technischem Inhalt für die Wasserversorgung. Die Cloud-Lösung soll aus mehreren Modulen bestehen, die verschiedene Themenfelder adressieren wie Analytik, Aufbereitung oder Asset-Management. Bisher wurden die einzelnen Module inhaltlich strukturiert und mit allen Beteiligten abgestimmt. Weiterhin wurde ein Entwurf für das Nutzerkonzept erstellt, das den Umgang mit Analyse-daten regelt. Im Fokus der Machbarkeitsstudie steht das Modul TRINK-IDENT, das eine gemeinschaftliche Auswertung von Daten aus dem Non-Target-Screening für den Nachweis von unbekanntem Spurenstoffen zum Inhalt hat. Mit diesem Modul soll die Cloud-Lösung starten. Um für die künftigen Herausforderungen der Digitalisierung gerüstet zu sein, verfolgt das TZW eine zukunftsorientierte **Digitalisierungsstrategie**. Diese zielt auf die

Entwicklung digitaler Produkte sowie der Modernisierung der TZW-internen Infrastruktur. Hierzu zählt die Entwicklung und Umsetzung von Ideen für digitale Lösungen für die Wasserversorgungsunternehmen. Intern wurde die IT-Infrastruktur verstärkt. Dazu gehört die Anbindung aller TZW-Standorte über Glasfasernetz mit Zentralisierung des Datenzugriffs. Zur Verfügung steht jetzt eine TZW-eigene Cloud, die die Kommunikation mit Wasserversorgungsunternehmen und die Bearbeitung von Forschungsprojekten unterstützt.

### Öffentlichkeitsarbeit

Das TZW setzt in der Öffentlichkeitsarbeit verstärkt auf digitale Angebote. So erscheint der TZW-Newsletter seit 2020 nicht mehr gedruckt, sondern kann als **E-Mail-Newsletter** über die Website [www.tzw.de](http://www.tzw.de) auf Deutsch oder auf Englisch abonniert werden. Er informiert etwa dreimal jährlich über aktuelle Themen, Projekte, Publikationen und Veranstaltungen. Das TZW veröffentlicht seit 2020 einen zweisprachigen **Jahresbericht / Annual report** in neuem, modernem Design und mit kompakten Inhalten zum TZW allgemein und den Schwerpunkten seiner Arbeitsgebiete. Die Bände 91 bis 95 der TZW-Schriftenreihe können ebenso wie der Jahresbericht gedruckt und digital über die Website bestellt werden. Aktivitäten auf **Social-Media-Kanälen** wie LinkedIn und youtube wurden im Jahr 2020 gestartet.

Fast 300 Personen waren online dabei, als vom 30. November bis 2. Dezember 2020 das **25. TZW-Kolloquium digital** stattfand. Zum Jubiläum musste aufgrund der Corona-Pandemie ein vollständig neues Format gewählt werden. Doch auch digital konnten aktuelle Themen für eine zukunftsfeste Wasserversorgung aufgenommen werden. An jeweils drei Tagen gingen drei Vorträge zu drei Themenkomplexen online (**Bild 4.11**). Im ersten Block präsentierten die TZW-Experten aktuelle Entwicklungen zu wesentlichen persistenten und mobilen Stoffen wie die Gruppe der polyfluorierten Verbindungen (PFAS). Im zweiten Block wurden Innovationen vorgestellt, die sich durch sich ändernde Rahmenbedingungen und gesetzliche Vorgaben ergeben. Der dritte Block widmete sich den mikrobiologischen Befunden und molekularbiologischen Verfahren sowie einer Bestandsaufnahme zu SARS-CoV-2 aus wasserwirtschaftlicher Sicht.

### TZW vernetzt

Aufgrund der Corona-Pandemie waren im Jahr 2020 Dienstreisen nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich. Daher wurden die nationalen und internationalen Kontakte im Rahmen von Forschungsprojekten oder Kundenbetreuung mit Hilfe von Webmeetings aufrechterhalten.



**Bild 4.11:** Das TZW-Kolloquium fand 2020 online statt. Der Hörsaal wurde als Aufnahmestudio genutzt.

Die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des TZW gestalten in rund **100 Arbeitsgruppen** aktiv die Zukunft des Wasserfaches mit. In der Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien und Netzwerken zeigt sich die hohe Expertise des TZW. Dies verdeutlicht die gute nationale und internationale Position und Reputation des TZW.

Am TZW befindet sich die Geschäftsstelle der **AWBR** (Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein), in der die Wasserversorger aus allen Bodenseeanrainerstaaten vertreten sind. Daneben ist das TZW auch in der IKSR (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) und in der IAWR (Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet) in Präsidium, Vorstand und Beirat aktiv. In der **Global Water Research Coalition** (GWRC), einer Vereinigung der international führenden Wasserforschungsinstitute und -unternehmen, ist der TZW-Geschäftsführer Mitglied des Vorstands und past-President.

Zum 31.12.2020 waren am TZW **52 Forschungsvorhaben** in Bearbeitung, die im Wesentlichen durch BMBF, BMWi, DVGW und EU gefördert wurden. Im gleichen Zeitraum wurden am TZW **43 Publikationen** in Fachbüchern und Fachzeitschriften sowie für Konferenzunterlagen angefertigt. Die vollständige Publikationsliste steht über die Website des TZW zum Download zur Verfügung. Hier sind 18 wissenschaftliche Publikationen beispielhaft aufgeführt.

## Literatur

- [28] Freeling, F.; Behringer, D.; Heydel, F.; Scheurer, M.; Ternes, T. A.; Nödler, K.: Trifluoroacetate in precipitation: Deriving a benchmark data set. *Environmental Science & Technology* 54, 11210-11249, <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c02910>, 2020.
- [29] Freeling, F.; Scheurer, M.; Sandholzer, A.; Armbruster, D.; Nödler, K.; Schulz, M.; Ternes, T. A.; Wick, A.: Under the radar - Exceptionally high environmental concentrations of the high production volume chemical sulfamic acid in the urban water cycle. *Water Research* 175, 115706, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115706>, 2020.
- [30] Gunnarsdottir, M. J., Gardarsson, S. M., Figueras, M.J., Puigdomènech, C., Juárez, R., Saucedo, G., Arnedo, M. J., Santos, R., Monteiro, S., Avery, L., Pagaling, E., Allan, R., Abel, C., Eglitis, J., Hambach, B., Hügler, M., Rajkovic, A., Smigic, N., Udovicki, B., Albrechtsen, H.-J., López-Avilés, A., Hunter, P.: Water safety plan enhancements with improved drinking water quality detection techniques. *Science of the Total Environment* 698, 134185, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134185>, 2020.
- [31] Happel, O.; Junginger, F.; Scheurer, M.; Kasprzyk, O.; Rodriguez, L.; Koch, M.; Krieg, G.; Vollmer, M.; Hoinkis, J.; Atiye, T.; Schäfer, B.; Cakir, U.; Schönung, J.: Praxiserfahrungen mit dem Online-Sensorsystem WATERTRACE im Bereich der Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. *Vom Wasser* 118, 2, 33-76, 2020.
- [32] Jekel, M.; Anger, P.; Bannick, C. G.; Barthel, A.-K.; Braun, U.; Braunbeck, T.; Dittmar, S.; Eisentraut, P.; Elsner, M.; Gnirß, R.; Grummt, T.; Hanslik, L.; Huppertsberg, S.; Ivleva, N. P.; Klöckner, P.; Knepper, T. P.; Köhler, H.-R.; Kraus, S.; Kuckelkorn, J.; May, E.; Müller, Y. K.; Nießner, R.; Obermaier, N.; Oehlmann, J.; Pittroff, M.; Reemtsma, T.; Schmiege, H.; Schmitt, T.; Schür, C.; Storck, F. R.; Strobel, C.; Triebkorn, R.; Wagner, M.; Wagner, S.; Witzig, C. S.; Zumbülte, N.; Ruhl, A. S.: Mikroplastik im Wasserkreislauf – Probenahme, Probenaufbereitung, Analytik, Vorkommen und Bewertung, Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-3162-4, <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/11522>, 2020.
- [33] Müller, Y. K.; Wernicke, T.; Pittroff, M.; Witzig, C. S.; Storck, F. R.; Klinger, J.; Zumbülte, N.: Microplastic analysis – are we measuring the same? Results on the first global comparative study for microplastic analysis in a water sample. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412, 555-560, <https://doi.org/10.1007/s00216-019-02311-1>, 2020.
- [34] Nödler, K.; Freeling, F.; Scheurer, M.; Schmid, R.; Schaffer, M.: Vorkommen kleiner hochpolarer Kontaminanten in Oberflächengewässern Niedersachsens. *Wasser und Abfall* 01-02, 14-19, 2020.
- [35] Ohe, P. C. von der; Freeling, F.; Alygizakis, N. A.; Slobodnik, J.; Oswald, P.; Aalizadeh, R.; Cirka, L.; Thomaidis, N. S.; Scheurer, M.: Explaining the rationale behind the risk assessment of surfactants by Freeling et al. (2019). *Science of the Total Environment* 721, 136828, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136828>, 2020.
- [36] Rott, E.; Happel, O.; Armbruster, D.; Minke, R.: Behavior of PBTC, HEDP, and Aminophosphonates in the process of wastewater treatment. *Water* 12(1), 53, <https://doi.org/10.3390/w12010053>, 2020.
- [37] Rott, E.; Happel, O.; Armbruster, D.; Minke, R.: Influence of wastewater discharge on the occurrence of PBTC, HEDP, and Aminophosphonates in sediment, suspended matter, and the aqueous phase of rivers. *Water* 12(3), 803, <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/803/htm>, <https://doi.org/10.3390/w12030803>, 2020.
- [38] Rüdell, H.; Körner, W.; Letzel, T.; Neumann, M.; Nödler, K.; Reemtsma, T.: Persistent, mobile and toxic substances in the environment: a spotlight on current research and regulatory activities. *Environmental Sciences Europe* 32, Article number: 5. SpringerOpen, <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0286-x>, 2020.
- [39] Scheurer, M.; Lesmeister, L.; Breuer, J.; Schultheiß, M.: Transfer von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) von belasteten Böden in Pflanzen. *Mitt. Umweltchem. Ökotox.* 26. Jahrgang/Nr. 2, 35-39, 2020.
- [40] Sidhu, J. P. S.; Gupta, V. V. S. R.; Stange, C.; Ho, J.; Harris, N.; Barry, K.; Gonzalez, D.; van Nostrand, J. D.; Zhou, J.; Page, D.; Tiehm, A.; Toze, S.: Prevalence of antibiotic resistance and virulence genes in the biofilms from an aquifer recharged with stormwater. *Water Research* 185, 116269, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116269>, 2020.
- [41] Stange, C.; Tiehm, A.: Occurrence of antibiotic resistance genes and microbial source tracking markers in the water of a karst spring in Germany. *Science of the Total Environment* 742, 140529, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140529>, 2020.
- [42] Tiehm, A.; Yin, D.; Zheng, B.: The SIGN-2 Project: Assuring good water quality from the source to the tap. *econet china monitor* 09, 10-13, 2020.
- [43] Tiehm, A.; Hollert, H.; Yin, D.; Zheng, B.: Tai Hu (China): Water quality and processes – From the source to the tap. *Science of the Total Environment* 712, 135559, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135559, 2020.
- [44] Witzig, C. S.; Földi, C.; Wörle, K.; Habermehl, P.; Pittroff, M.; Müller, Y. K.; Lauschke, T.; Fiener, P.; Dierkes, G.; Freier, K. P.; Zumbülte, N.: When good intentions go bad – False positive microplastic detection caused by disposable gloves. *Environmental Science & Technology*, <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c03742>, 2020.
- [45] Wricke, B.; Plume, S.; Kritznier, I.; Jähnel, M.: Manganeliminierung im Rahmen der Talsperrenwasseraufbereitung. *gwf-Wasser | Abwasser* 161/9, 40-47, 2020.

## Weitere Informationen:

<https://tzw.de/>



Autoren

**Prof. Dr. rer. nat. Harald Horn**

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



**Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis**

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



**Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb**

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



**Dr. rer. nat. Josef Klinger**

TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser  
Karlsruhe  
Tel.: 0721 9678-110  
josef.klinger@tzw.de  
<https://tzw.de/>



Foyer des Engler-Bunte-Hörsaals im Neubau 40.50

