

aus gwf Gas + Energie 06/2019 + 07-08/2019 und  
gwf Wasser|Abwasser 06/2019

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 Jahre 2018

DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW:  
DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

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





# Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser im Jahre 2018

DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW:  
DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

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

Forschung und Lehre, Tätigkeitsbericht, Ausbildung, Weiterbildung

Dieser Bericht soll einen Überblick über aktuelle Entwicklungen und Aktivitäten im Jahr 2018 am Engler-Bunte-Institut, der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut sowie der Forschungsstelle für Brandschutztechnik ermöglichen. Ebenso wird über das aus dem Engler-Bunte-Institut hervorgegangene TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser berichtet. Wie in den vergangenen Jahren erscheinen die gasspezifischen Beiträge im gwf-Gas + Energie und die wasser-spezifischen Beiträge im gwf-Wasser | Abwasser. Im Mittelpunkt des Berichtes steht die Entwicklung der oben angegebenen Einrichtungen im Jahr 2018 mit Beiträgen aus der universitären Lehre, der Ausbildung und Weiterbildung, über Forschungs- und Entwicklungsprojekte, über Beratung und Firmenkontakte sowie sonstige Aktivitäten. Der Bericht streift ebenso die Entwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

## Karlsruhe Institute of Technology

This report aims at giving an overview about actual developments and activities of the Engler-Bunte-Institut, the DVGW Research Center, the Research Center of Fire Protection Technology and the TZW: DVGW-Water Technology Center, which developed from the Engler-Bunte-Institut. As usual, the gas related parts can be found in gwf-Gas + Energie and the water related parts in gwf-Wasser | Abwasser. The report 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. The report also refers to the latest development of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

### Zur Geschichte und zum Umfeld

Das Engler-Bunte-Institut am Karlsruher Institut für Technologie ist hervorgegangen aus der 1907 gegründeten ehemaligen „Lehr- und Versuchsgasanstalt“ und führt seit 1971 den Namen „Engler-Bunte-Institut“. Die enge Verbindung zur Praxis des Gas- und Wasserfaches äußert sich

darin, dass die jeweiligen Lehrstuhlinhaber, gegenwärtig „Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie“, „Verbrennungstechnik“ und „Wasserchemie und Wassertechnologie“ auch in Personalunion Leiter der entsprechenden Bereiche der Forschungsstelle des DVGW im Engler-Bunte-Institut sind (**Organisationsstruktur**).



Organisationsstruktur des Engler-Bunte-Instituts und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut

Das Karlsruher Institut für Technologie – kurz KIT – ist am 1. Oktober 2009 durch den Zusammenschluss des Forschungszentrums Karlsruhe und der Universität Karlsruhe entstanden. Das KIT vereint die Aufgaben einer Universität des Landes Baden-Württemberg und einer Forschungseinrichtung der Helmholtz-Gemeinschaft in Forschung, Lehre und Innovation. Es ist die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft. Im KIT wird seit dem Jahre 2015 der übergeordnete Strategieprozess umgesetzt, der als Konsequenz des zuvor erarbeiteten Leitbilds des KIT angesehen werden kann. Einige auch für die Arbeiten des Engler-Bunte-Instituts (EBI) wichtige Sequenzen aus dem KIT-Leitbild seien zitiert: Das KIT sieht 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 mit seinen angeschlossenen Forschungsstellen trägt im Rahmen der For-

schungs- und Lehrtätigkeit auf den Themenschwerpunkten Energie und Umwelt wesentlich zur Umsetzung des KIT-Leitbilds bei.

Eine große Zahl von neuen Forschungsprojekten aus dem Gas- und Verbrennungsfach sowie dem Wasserfach zeugen von der nationalen und internationalen Bedeutung der Lehrstühle für die Grundlagenforschung und der Praxisnähe der ihnen zugeordneten Laboratorien und Technologieeinheiten. Die einzelnen Forschungsprojekte werden in den Berichten der Institutsbereiche ausführlich dargestellt. Die aus der Praxis entstehenden Fragestellungen werden vor allem in der DVGW-Forschungsstelle, der Abteilung Gastechnologie, dem Prüflaboratorium Gas und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bearbeitet. In 2018 übernahm Dr. Jens Hoffmann die Leitung des Prüflaboratoriums Gas nach dem altersbedingten Ausscheiden von Jürgen Stenger. Das Technologiezentrum Wasser mit seiner praxisgerechten Kompetenz in Analytik, Aufbereitung, Ressourcenschutz, Korrosion, Verteilungsnetze und Umweltbiotechnologie bedient Wasserversorgungsunternehmen, Behörden und Verbände.

Viele der Projekte wurden und werden durch Institutionen wie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF), der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), der Deut-

schen Bundesstiftung Umwelt (DBU), der Europäischen Kommission und anderen Drittmittelgebern des Bundes und des Landes gefördert. Ein erheblicher Anteil wird aber auch durch Forschungsaufträge aus Industrie und Unternehmen finanziert. Schließlich trugen Stiftungen und gemeinnützige Fördervereinigungen zur Umsetzung so mancher Forschungsidee bei. Ein besonderer Partner ist hierbei die Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts, die das Institut insbesondere bei unerwartet auftretenden Schwierigkeiten großzügig unterstützt. Die Ergebnisse der zahlreichen Forschungsprojekte sind in einer beachtlichen Zahl von Publikationen dokumentiert, die zum großen Teil in den führenden internationalen Fachjournalen nach strenger Begutachtung erschienen sind. Die Verzeichnisse sind den Berichten der einzelnen Bereiche zu entnehmen.

In 2018 wurde auch der erste Bauabschnitt des Neubaus des Engler-Bunte-Instituts realisiert und als Gebäude 40.50 bzw. 40.51 am KIT eröffnet. Die neuen Räumlichkeiten werden seither sowohl im Rahmen des Vorlesungsbetriebs als auch übergangsweise im Rahmen des MINT-Kollegs Baden-Württemberg unter der Schirmherrschaft des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg genutzt, das eine Einrichtung zur Verbesserung der fachlichen Voraussetzungen und Kenntnisse in der Übergangsphase von der Schule zum Fachstudium ist.

Die beiden Bachelor- und Master-Studiengänge „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ und „Bioingenieurwesen“ erfreuen sich weiterhin hoher Attraktivität bei den Studierenden. Im Rahmen der Studiengänge

„Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ und „Bioingenieurwesen“ beteiligt sich das Engler-Bunte-Institut in der Grundausbildung und bietet in den Bereichen Brennstoffe, Energieverfahrenstechnik, Verbrennung und Wasserchemie/Wassertechnologie eine Reihe von Hauptfächern, Vertiefungsrichtungen und Profulfächern an. Neben der Studierenden- und Doktorandenausbildung stand wie immer auch die Weiterbildung der bereits im Beruf stehenden Fachleute auf dem Programm. 2018 wurde der Gaskurs, ebenso wie der jährliche Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfachs, wieder sehr erfolgreich durchgeführt. Er dient der Weiterbildung und soll neuen und fachfremden Mitarbeitern der Versorgungsunternehmen die Einarbeitung in gasfachliche Themen erleichtern. Erfahrenen technischen Fach- und Führungskräften der Versorgungswirtschaft und für die Gasversorgung in Industrieunternehmen verantwortlichen Mitarbeitern werden darin aktuelle gasfachliche Themen nähergebracht.

Auch das Jahr 2018 hat gezeigt, dass das Engler-Bunte-Institut mit seinen Lehrstühlen, Prüfstellen und der DVGW-Forschungsstelle sowie das Technologiezentrum Wasser des DVGW gut aufgestellt sind. Neu eingeworbene Forschungsprojekte weiten die Kooperationen innerhalb Deutschlands und international aus. Der folgende Tätigkeitsbericht enthält Beiträge der einzelnen Bereiche des Engler-Bunte-Instituts, der DVGW-Forschungsstelle am EBI und des TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser. Weitere und ausführliche Informationen sind auch im Internet auf den Seiten des Instituts und der einzelnen Bereiche sowie des TZW zu finden.

## 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

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

Die Forschungsarbeiten des EBI ceb konzentrieren sich auf die Erzeugung chemischer Energieträger aus fossilen und biogenen Energierohstoffen durch thermochemische Prozesse, insbesondere Vergasung bei hohem Druck, die Synthese von Brennstoffen über chemisch-katalytische und biologische Prozesse sowie die Aufbereitung von Brenngasen.

Die grundlagenorientierten F&E-Arbeiten des EBI ceb werden ergänzt durch die Arbeiten zur Flugstromvergasung der Abteilung Vergasungstechnologie am Institut für Technische Chemie, ITC vgt, am Campus Nord des KIT.

Durch die enge Verbindung zwischen EBI ceb und ITC vgt werden die großen Forschungseinrichtungen des Campus Nord auch für die Ausbildung der Studierenden 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 ermöglicht 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 Gastech-

nik“, „Technical Systems for Thermal Waste Treatment“ und „Wirbelschichttechnik“ werden von den Lehrenden des EBI ceb angeboten. Das Vorlesungsangebot 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 ingenieurtechnischen Grundlagenkenntnisse, erweitert die Kompetenzen in der Bewertung von technischen Prozessen und Verfahren und zeigt Beispiele für die Umsetzung in die technische Anwendung. Das integrierte Praktikum an der bioliq-Pilotanlage im Campus Nord ermöglicht

den Studierenden einen Einblick in einen industrienahe Anlagenkomplex.

Die Vorlesung „Organisch-chemische Prozesskunde“ im Bachelor-Studiengang sowie diverse Praktika und Exkursionen für die Studienrichtungen Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen ergänzen das Lehrangebot des EBI ceb. In Kooperation mit EBI vbt ist EBI ceb verantwortlich für die Vorlesung „Energieverfahrenstechnik“ und das Profilmfach „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, der Energie-Master-Studiengang im Bereich der KIT School of Energy sowie die Weiterbildung von Bachelor-Ingenieuren mit Industrieerfahrung im Rahmen der HECTOR School.

## 1.2 Wichtige Ereignisse des Jahres

### **Inbetriebnahme der STORE&GO Methanisierung in Falkenhagen**

Im Mai 2018 haben die Partner des EU-Forschungsprojektes STORE&GO eine Pilotanlage zur Erzeugung von „grünem“ Methan im brandenburgischen Falkenhagen eingeweiht (**Bild 1.1**). Seit Januar 2019 speist die Anlage bis zu 1.400 m<sup>3</sup>/Tag synthetisches Erdgas (SNG) ins Netz ein. Die Anlage in Falkenhagen ist mit einer katalytischen Wabenmethanisierung ausgestattet, die im Arbeitsgebiet katalytisch-chemische Verfahren, Dr. Bajohr, des EBI ceb entwickelt und im Rahmen des EU-Projekts DemoSNG unter der Leitung der DVGW-Forschungsstelle in einer Pilotanlage realisiert wurde (weitere Details s. Abschnitt 1.3.2 und 1.4.2).

### **Deutsch-chinesische Forschungskooperation**

Am 11. Juni 2018 besuchte eine chinesische Delegation der Dalian University of Technology, School of Chemical Engineering, die von Prof. Dr. Haoquan Hu, dem Direktor des Institute of Coal Chemical Engineering geleitet wurde, das EBI ceb. Prof. Hu, der auf dem Gebiet der Kohlepyrolyse arbeitet, kennt das EBI aus mehreren Forschungsaufenthalten. Eine intensive Diskussion auch mit Kollegen aus dem Campus Nord verbunden mit der Besichtigung verschiedener Laboreinrichtungen und Versuchsanlagen (bioliq, STYX, PAT, REGA am CN und der Vergasungsfor-



**Bild 1.1:** STORE&GO Demonstrationsanlage „WindGas“ am Uniper-Standort in Falkenhagen

**Tabelle 1.1:** Chronologie der Baumaßnahme 40.50 und 40.51

2010	Planungsbeginn einschließlich Sanierung des Gebäudes 40.12.
2011–2012	Nutzungsanforderung und Flächenplanung für Neubau der EBI Gebäude
März 2013	VOF-Verfahren für den ersten Bauabschnitt (Zentralgebäude EBI (Geb. 40.50) und Institutsgebäude EBI ceb (Geb. 40.51)); Beauftragung Architekturbüro Reiner Becker Architekten Berlin.
Januar 2015	Erste Baumfällungen, Umverlegungsarbeiten von Telekom und diversen Leitungen ab Frühjahr 2015
März 2015	Umzug der Nutzer aus Gebäude 40.11 in Gebäude 40.12
Juni 2015	Abbruch Gebäude 40.11
Sept. 2015	Baubeginn Gebäude 40.50 und 40.51
März 2016	Grundsteinlegung
März 2018	Fertigstellung erster Bauabschnitt EBI
Nov. 2018	Feierliche Übergabe der Gebäude 40.50 und 40.51



**Bild 1.2:** Links: Schlüsselübergabe für die neuen Gebäude (H. Hanselka, E. Sitzmann, U. Orth), Rechts: Blick in den neuen Hörsaal

schung am EBI ceb) zeigte verschiedene Anknüpfungspunkte für eine Forschungs Kooperation auf. Ein Gegenbesuch in Dalian wurde vereinbart.

### **Neue Gebäude für das Engler-Bunte-Institut**

Der Neubau des Engler-Bunte-Instituts startete im Jahr 2010 mit der Planung für den 1. Bauabschnitt, der sich in die beiden Gebäude 40.50 (Hörsaal- u. Seminar-Gebäude) und 40.51 (Flächen für EBI ceb) gliedert.

Nach einer dreijährigen Bauphase wurde im November 2018 im feierlichen Rahmen der Schlüssel für die neuen Gebäude von Frau Ministerin Edith Sitzmann an den Präsidenten des KIT Herrn Prof. Holger Hanselka im Beisein von Herrn Ministerialdirektor Ulrich Steinbach und Frau Baudirektorin Ursula Orth übergeben (**Bild 1.2** und **Tabelle 1.1**).

### **Große Projekte zur Energiewende**

Auch im Jahr 2018 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, an denen das EBI maßgeblich beteiligt ist:

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.
2. Horizon 2020 Projekt „STORE&GO“: Schwerpunkt des dritten Projektjahres bildete der Aufbau und die Inbetriebnahme der drei PtG-Demonstrationsanlagen an den Standorten Falkenhagen (D), Troia (I) und Solothurn (CH).
3. Kopernikus-Projekt „P2X“ (BMBF): 2018 erfolgte der Aufbau einer 100-kW-Pilotanlage zur Dreiphasen-Methanisierung am Energy Lab 2.0 des KIT (Campus Nord).

4. Kopernikus-Projekt „ENSURE“ (BMBF): 2018 wurde das Thema „Sektorenkopplung durch Kopplung von Strom- und Gasnetzen“ als Arbeitsschwerpunkt im Konsortium weiter vertieft.

### **Dissertationen**

Folgende Doktoranden des EBI ceb haben im Jahr 2018 erfolgreich promoviert:

- Herr M.Sc. David Koch zum Thema „Pyrolysis and Carbonitriding Behavior of Methylamine During Low Pressure Carbonitriding of Steel“ bei Prof. Dr.-Ing. R. Reimert;
- Herr Dipl.-Ing. Hilko Eilers zum Thema „Flexibler Betrieb der Fischer-Tropsch-Synthese – Katalysator- und Reaktorverhalten mit CO in der 3-Phasen-Blasensäule“ bei Prof. Dr.-Ing. Georg Schaub
- Herr Dipl.-Ing. Alexander Sänger zum Thema „Zerstäubung hochviskoser Fluide bei variierendem Systemdruck – Grundlagenforschung zur Hochdruck-Flugstromvergasung“ bei Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb

## **1.3 Laufende wissenschaftliche Arbeiten**

### **1.3.1 Arbeitsgruppe thermochemische Verfahren der Brennstoffwandlung**

Thomas Kolb, Fabian Hüsing, Christoph Schneider

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 festen und flüssigen Brennstoffen. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten am EBI ceb werden für die Erstellung eines Simulationswerkzeugs zur Beschrei-

bung des Brennstoffumsatzes in einem Hochdruck-Flugstromvergaser genutzt. Die Arbeiten zur numerischen Simulation erfolgen im Rahmen des HVI GasTech.

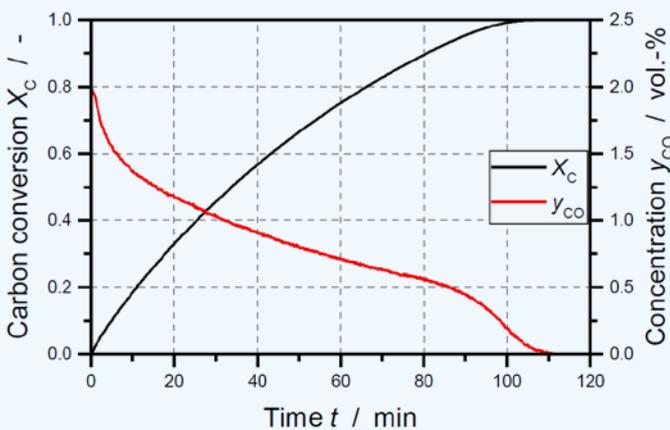
**Kinetik der Feststoffvergasung**

Bei der Hochdruck-Flugstromvergasung in der bioliq-Pilotanlage am Campus Nord werden Suspensionsbrennstoffe aus Pyrolyseöl und Pyrolysekoks eingesetzt. Nach der Zerstäubung und Verdampfung des Flüssiganteils durchläuft das verbleibende Koks Korn eine sogenannte Sekundärpyrolyse. Die Reaktion des bei hohen Temperaturen und Aufheizraten entstehenden Sekundärkokes mit der Gasphase  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt des Vergasungsprozesses. Für die Ermittlung der Kinetik dieser heterogenen Vergasungsreaktionen muss zunächst ein Pyrolysekoks unter prozessnahen Bedingungen erzeugt werden. Für die Erzeugung dieses Modellbrennstoffes steht am EBI ceb ein atmosphärischer Hochtemperatur-Fallrohrreaktor zur Verfügung, der sowohl für die Erzeugung des Pyrolysekokes unter inerten Bedingungen, als auch für die Untersuchung der Koks kinetik bei sehr schnellen Aufheizraten ( $10^4 \text{ K/s}$ ) genutzt wird.

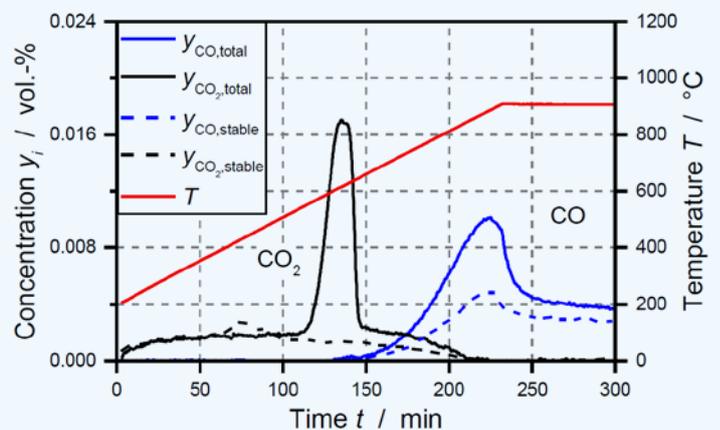
Für die Ermittlung der heterogenen Vergasungskinetik mit  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  werden zwei unterschiedliche Reaktorkonzepte eingesetzt, die auch unter erhöhtem Druck betrieben werden können. Zum einen kann mittels Druck-Thermogravimetrie (pTGA) die Massenabnahme einer kleinen Probenmenge Pyrolysekoks in einem Tiegel als Funktion des Partialdrucks der Reaktionsgase und der Temperatur gemessen werden. Zum anderen wird am EBI ceb ein Hochtemperatur-Festbettreaktor betrieben, mit dem die intrinsische Reaktionskinetik der Vergasung in einem großen Parameterbereich ohne Stofftransportlimitierungen gemessen werden kann. Bei diesem Verfahren werden die Produktgase analysiert, anhand der Änderung der Produktgaskonzentration kann direkt auf die

Umsatzrate und dementsprechend auf die Feststoffreaktivität geschlossen werden.

Darüber hinaus wird am EBI ceb Grundlagenforschung im Bereich der Entwicklung der physikalischen und chemischen Oberfläche des Koks korns während der Vergasung betrieben. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Unterscheidung zwischen Gesamtoberfläche und der für die Kinetik relevanten reaktiven Oberfläche (aktive Kohlenstoffzentren). Hierfür steht ein Chemisorptionsmessgerät zur Verfügung, das zur Gasphasenanalyse online an ein Massenspektrometer gekoppelt ist. Die Bestimmung der reaktiven Oberfläche erfolgt mithilfe der Methodik der temperaturprogrammierten Desorption (TPD). Zudem kann neben der reaktiven Oberfläche auch die Dispersion katalytisch aktiver Aschebestandteile mittels Chemisorption (Temperatur-Programmierte Reaktion, TPR) gemessen werden. Sowohl die Kohlenstoffmatrix als auch katalytisch wirkende Aschebestandteile haben Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit der Festbrennstoffe und können mit dieser korreliert werden. **Bild 1.3 a** zeigt den Umsatz sowie den Verlauf der  $\text{CO}$ -Konzentration während der Vergasung eines biogenen Modellbrennstoffs (WC1600) mit  $\text{CO}_2$  bei  $820 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die  $\text{CO}$ -Konzentration hat ein Maximum von 2 Vol.-% zu Beginn der Vergasungsreaktion und sinkt anschließend stetig. Die gesamte Vergasungsdauer beträgt rund 110 min. **Bild 1.3 b** veranschaulicht die Desorptionsspektren nach Teilvergasung der Probe WC1600 bis 75 % Kohlenstoff-Umsatz während der nachgeschalteten Temperatur-programmierten Desorption. Aus dem Verlauf der desorbierenden Gase kann auf die Anzahl reaktiver Oberflächenkomplexe geschlossen werden, die zur Bildung von  $\text{CO}$  führen. Es ist zu erkennen, dass  $\text{CO}_2$  bei niedrigen (ca.  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und  $\text{CO}$  bei höheren Temperaturen (ca.  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ) desorbiert. Das Verfahren erlaubt auch zwischen den beiden Oberflächenkomplextypen „stabil“ und „reaktiv“ zu unterscheiden. Die bisherigen Untersu-



**Bild 1.3a:** Kohlenstoff-Umsatz und Umsatzrate von WC1600



**Bild 1.3b:** Desorptionsspektren während des Aufheizvorgangs

chungen haben gezeigt, dass zur Berechnung der reaktiven Oberflächenkomplexe auch die Zersetzungsreaktionen von Aschekomponenten berücksichtigt werden müssen, die ebenfalls CO und CO<sub>2</sub> freisetzen und somit das Messergebnis beeinflussen.

Die Arbeiten zur Entwicklung der chemischen und physikalischen Oberfläche des Kokskorns werden in enger Zusammenarbeit mit Frau Prof. Sonia Rincón von der Universidad Nacional de Colombia (UNAL) in Bogotá durchgeführt. Sie verstärkte auch im Jahre 2018 die Arbeitsgruppe thermochemische Verfahren mit einem mehrwöchigen Forschungsaufenthalt, bei dem sie auch kolumbianische Austauschstudenten während ihres Praktikums am EBI ceb betreute. Neben der Kooperation mit UNAL wird ein enger Kontakt zur Forschungsgruppe um Prof. Rikard Gebart und Prof. Kentaro Umeki von der Lulea University of Technology (LTU) in Schweden gepflegt. Die gemeinsamen Forschungsarbeiten dienen hierbei der Aufklärung struktureller Veränderungen der Kohlenstoff-Matrix und anorganischer Aschekomponenten biogener Festbrennstoffe infolge thermischer Beanspruchung während Pyrolyse und Vergasung.

Die Forschungsarbeiten zur Ermittlung der Reaktionskinetik fester Brennstoffe bei erhöhtem Druck werden im Rahmen der Promotion von Herrn M.Sc. Christoph Schneider durchgeführt.

### **Thermochemische Umsetzung von Pyrolyseöl**

Die Forschungsarbeiten zur Beschreibung der Umsetzung der Flüssigphase von Suspensionsbrennstoffen befinden sich im Aufbau. Zurzeit wird der oben beschriebene Hochtemperatur-Fallreaktor auf ein duales Fördersystem umgerüstet, das den Eintrag von flüssigen und festen Brennstoffproben in Form von Einzeltropfen und Partikeln ermöglicht. Damit wird die Umsetzung von Einzeltropfen unter Vergasungsbedingungen sowie die Bildung von Sekundärkoks in Form von Cenosphären untersucht. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde die Bildung von Tropfenketten bei hochviskosen Fluiden betrachtet. Es zeigte sich, dass die Fluide mit zunehmender Viskosität zur Ausbildung von Ligamenten neigen, sodass ein Ablösen von Einzeltropfen verhindert wird. Diesem Effekt kann durch das Herabsetzen der Austrittsgeschwindigkeit begegnet werden, für die Untersuchungen an isolierten monodispersen Tropfen muss entsprechend am Hochtemperatur-Fallreaktor ein System mit einer niedrigen Förderrate installiert werden. Neben den Experimenten im Hochtemperatur-Fallreaktor erfolgt die Beschreibung der Brennstoffumsetzung mit Hilfe der thermogravimetrischen Analyse. Aus den komplementären Messdaten beider Systeme soll eine modelltechnische Beschreibung für den Umsatz von Pyrolyseölen abgeleitet werden, die für die am Campus Nord in Koopera-

tion mit der TU Clausthal (Prof. Roman Weber) entwickelte numerische Simulation des Gesamtvergasungsprozesses von Suspensionsbrennstoffen eingesetzt wird.

Die Forschungsarbeiten zur Reaktionskinetik flüssiger Brennstoffe werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn M.Sc. Fabian Hüsing durchgeführt.

### **1.3.2 Arbeitsgruppe katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffkonversion**

Siegfried Bajohr, Rafael Becka, Mathias Held, Florian Nestler, Simon Sauerschell, Dominik Schollenberger, Nike Trudel

Erzeugung, Umwandlung und Veredelung chemischer Energieträger erfolgt in der Regel mit Hilfe von katalytischen Prozessen. Für die Nutzung regenerativer Energieträger gilt dies ganz besonders dann, wenn diese in Stoffe umgewandelt werden, die zur heutigen Verteilinfrastruktur für vornehmlich fossile Energieträger kompatibel sind. Abhängig von den Ausgangsstoffen und den gewünschten Produkten werden dabei vielfältige Anforderungen an die Prozesse gestellt, die teilweise nur durch neue Verfahrenskonzepte – z. B. dynamisch betreibbare katalytische Reaktionssysteme mit hoher Prozessintegrität – gemeistert werden können. In den Forschungsarbeiten der Arbeitsgruppe „katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffkonversion“ konzentrieren sich die Untersuchungen vor allem auf die Umsetzung CO- und/oder CO<sub>2</sub>-haltiger Gase in katalytischen Syntheseprozessen als Teil von dynamisch betreibbaren PtX-Prozessketten.

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

In 2018 wurde auf dem Gelände des KIT Campus Nord mit dem Bau einer Dreiphasen-Methanisierungsanlage im Pilotmaßstab (100 kW Methanproduktion) begonnen. Das Engler-Bunte-Institut, EBI ceb, arbeitet hierbei an dem Projekt „Energy Lab 2.0“ mit, bei dem mit Mitteln aus Bund und Land diverse Komponenten künftiger Energiesysteme im Pilotmaßstab realisiert und zu einem Anlagenverbund zusammengefasst werden. Ziel des Energy Lab 2.0 ist es, das Zusammenspiel der einzelnen Technologien zu erforschen und in einem möglichst realitätsnahen Versuchsumfeld zu erproben.

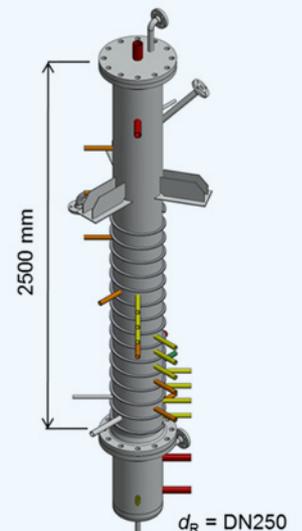
Die Methanisierung im Dreiphasensystem weist großes Potenzial hinsichtlich ihrer Nutzung als Teil von PtG-Prozessen auf. Die wichtigsten Vorteile liegen hierbei in der exakten Temperaturkontrolle, welche durch die integrierte Wärmeträgerflüssigkeit erreicht wird, sowie der Möglichkeit eines hochdynamischen Betriebs, der bei steigendem Anteil von erneuerbaren Energien im Strom-Mix erforderlich sein wird.

Der Aufbau der Dreiphasen-Methanisierungsanlage wurde in 2018 so weit vorangetrieben, dass die Anlage in

**Bild 1.4:** Energy Lab Pilotanlage zur Dreiphasen-Methanisierung (links) und Reaktorskizze (rechts)



**Energy Lab 3PM-Reaktor**



der ersten Jahreshälfte 2019 in Betrieb gehen wird. Ein aktuelles Foto der Anlage und Details zum Reaktor zeigt **Bild 1.4**.

Nach Inbetriebnahme der Dreiphasen-Methanisierung sind im Rahmen weiterer Forschungsprojekte Versuchskampagnen in 2019 geplant – u. a. für das BMBF-Verbundprojekt „Kopernikus Power-to-X“, in dem die Kopplung von Methanisierung und Gas-Verflüssigung zur dezentralen Herstellung von LNG (Liquefied Natural Gas) als eine mögliche Variante der PtX-Technologie untersucht wird. Darüber hinaus ist die Anlage auch in das im Abschnitt 1.4 vorgestellte BMWi-Projekt „MethQuest“ eingebunden, wo im Teilprojekt „MethFuel“ die Kopplung der Dreiphasen-Methanisierung mit der vorgeschalteten Elektrolyse sowohl im Labor als auch im Pilotmaßstab untersucht werden.

Im Jahr 2018 erfolgten für „Kopernikus Power-to-X“ erste Potenzialabschätzungen mit Hilfe von Simulationsrechnungen zur Dreiphasen-Methanisierung, die auf am Institut laufenden Forschungsarbeiten basieren. Eines der Ergebnisse ist, dass bei der  $\text{CO}_2$ -Methanisierung das  $\text{CO}_2$  nahezu vollständig umgesetzt werden kann, wenn dem Methanisierungs-Reaktor Wasserstoff mindestens im doppelten stöchiometrischen Verhältnis zugeführt wird. In diesem Fall kann auf eine nachfolgende  $\text{CO}_2$ -Abscheidung zwischen Methanisierung und Verflüssigung verzichtet werden. Bei der nachgeschalteten Verflüssigung wird das Produktgas  $\text{CH}_4$  als LNG abgetrennt, der nicht umgesetzte Wasserstoff wird in die Methanisierung recycelt. Der hohe Wasserstoffgehalt im Produktgas nach der Methanisierung erhöht allerdings den Energieaufwand zur Verflüssigung des Methans: In den Simulationen ergibt sich mit ca. 0,9 kWh pro kg erzeugtem LNG etwa der doppelte spezifische Energiebedarf gegenüber

der Verflüssigung von reinem Methan. Untersucht wurde in den Simulationen ein einfacher Mixed-Refrigerant-Prozess. Der Energiebedarf würde sich zudem noch einmal verdoppeln, wenn das kalte Flashgas nicht wie in **Bild 1.5** dargestellt erneut durch den Wärmeübertrager geleitet wird. Dennoch könnte sich diese Fahrweise vor allem bei kleinen, dezentralen Anlagen lohnen, da der apparatetechnische Aufwand geringer ist und zusätzlich der Energieaufwand für die  $\text{CO}_2$ -Entfernung entfällt.

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

#### **Methanisierung mit katalytischen Wabenreaktoren**

Über das EU-Projekt „STORE&GO“ wurde bereits mehrfach berichtet. In 2018 erlebten die Arbeiten zur Verfahrensentwicklung einer mit katalytischen, metallischen Waben ausgestatteten Methanisierung ihren bisherigen Höhepunkt. Am 09. Mai 2018 wurde die im Abschnitt 1.2 gezeigte Methanisierung (siehe **Bild 1.1**) der „WindGas“-Anlage am Uniper-Standort Falkenhagen feierlich eröffnet. Die darin zum Einsatz kommenden kommerziellen metallischen Wabenkörper wurden mit einer in der Arbeitsgruppe entwickelten Imprägniermethode katalytisch beschichtet, der Reaktor wurde basierend auf den Forschungsarbeiten am EBI ceb ausgelegt und die Inbetriebnahme vor Ort wurde durch unser Personal und unsere Expertise tatkräftig unterstützt. Durch begleitende Laboruntersuchungen konnte bereits vor Einbau der Wabenkörper eine ausreichend hohe katalytische Aktivität und auch Selektivität des Katalysators über mehrere 100 h gezeigt werden. Wenige Wochen nach der Eröffnung der „WindGas“ Anlage in Falkenhagen wurde syn-

thetisches Erdgas (SNG) in ausreichender Qualität für die Einspeisung in das Transportnetz der Ontras produziert. Bis zum Ende des Jahres 2018 wurde die Anlage ca. 400 h betrieben und für den fernbetätigten Betrieb ertüchtigt, damit in 2019 die im Rahmen von STORE&GO vorgesehenen Versuche durchgeführt werden können und weitere Erfahrung aus dem Alltagsbetrieb gesammelt werden kann.

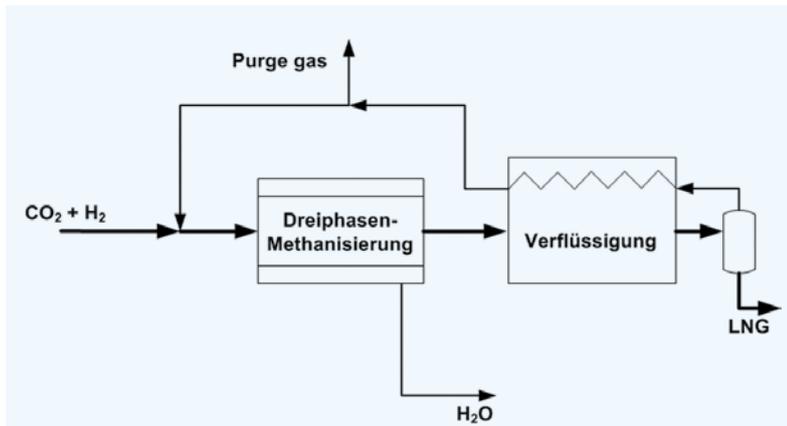
Im Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten zur Methanisierung in Wabenreaktoren stand die Finalisierung der im Jahr 2016 begonnenen Arbeiten an einem Teststand zur wärmetechnischen Charakterisierung verschiedener Wabenkörper. Mit der entwickelten Messmethode wurde die effektive radiale Wärmeleitfähigkeit verschiedener kommerzieller Wabenkörper ermittelt und ein Modell für die Beschreibung des radialen Wärmetransports mit den experimentellen Ergebnissen validiert. Das Modell berücksichtigt die bei kommerziellen Wabenkörpern vorhandenen Spalte zwischen den einzelnen Blechlagen, welche bei Literaturansätzen nicht berücksichtigt werden. In **Bild 1.6** ist die mit dem entwickelten Widerstandsmodell berechnete effektive radiale Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Leerraumanteils aufgetragen und etablierten Literaturansätzen vergleichend gegenübergestellt. Für die Berechnung wurde kein Spalt angenommen, um die Ergebnisse mit der Literatur vergleichen zu können. Weitergehend wurde ein radiales Widerstandsmodell für das Reaktionsrohr in einem Wabenreaktor aufgestellt, welches nicht nur den Einzelkanal berücksichtigt, sondern auch den Wabenmantel, das Druckrohr und den äußeren Wärmeübergang an das Wärmeträgermedium. Anschließend wurde dieses Widerstandsmodell zur wärmetechnischen Charakterisierung verschiedener Reaktoraufbauten genutzt.

Weitergehend wurde basierend auf einer Simulationsrechnung und experimentellen Parameterstudien die thermische Stabilität des Wabenreaktors betrachtet. Die Verläufe der experimentellen Ergebnisse können mit einfachen Kennzahlen bzw. Kriterien beschrieben und somit die Ausbildung eines Hotspots in der Wabe ohne numerische Verfahren vorausberechnet werden.

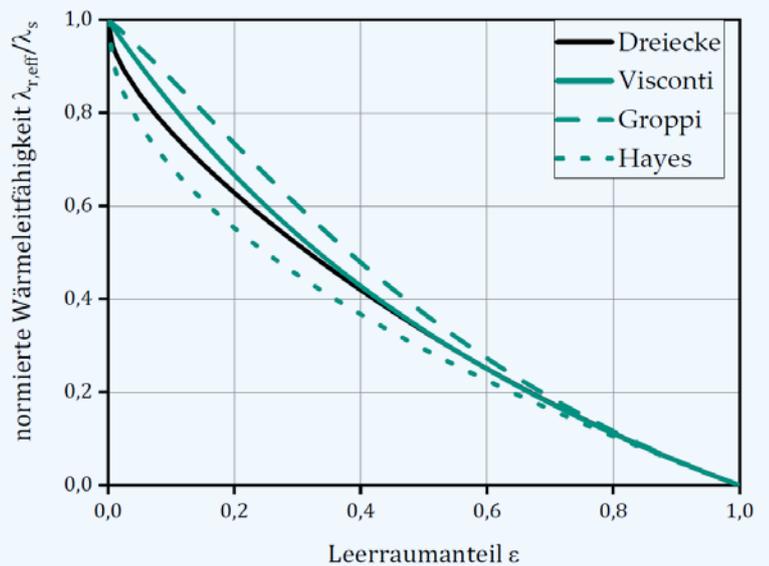
Die Forschungsarbeiten zur Wabenmethanisierung werden im Rahmen der Promotionsarbeit von Herrn Dipl.-Chem. Dominik Schollenberger durchgeführt.

**Methanolsynthese mit CO<sub>2</sub>-reichen Synthesegasen**

Im Rahmen des laufenden Verbundprojektes „OptiMeOH“ wurde im Jahr 2018 eine Versuchsanlage zur Methanolsynthese im Dreiphasenreaktor am EBI ceb in Betrieb genommen. Die Motivation für die Untersuchung der Methanolsynthese im Dreiphasenreaktor liegt wie bei der Methanisierung in den zu erwartenden Vorteilen bei dynamischer Fahrweise, was besonders als Teil von PtX-



**Bild 1.5:** Grundfließbild der gekoppelten Methanisierung und Verflüssigung



**Bild 1.6:** Vergleich der Modelle zur Berechnung der effektiven radialen Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Leerraumanteils (Dreiecke = eigenes Modell; Visconti [1]; Groppi [2]; Hayes [3])

[1] Visconti, C. G.; Groppi, G.; Tronconi, E.: Accurate prediction of the effective radial conductivity of highly conductive honeycomb monoliths with square channels. *Chemical Engineering Journal* 223 (2013), S. 224–230

[2] Groppi, G.; Tronconi, E.: Continuous vs. discrete models of nonadiabatic monolith catalysts. *AIChE Journal* 42 (1996) 8, S. 2382–2387

[3] Hayes, R. E.; Rojas, A.; Mmbaga, J.: The effective thermal conductivity of monolith honeycomb structures. *Catalysis Today* 147 (2009), S. S113-S119

Prozessketten zum Tragen kommt. Neu hinzu kommt bei der Methanolsynthese die Herausforderung der Verwendung von CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle, da dies im Gegensatz zur Methanisierung nicht Stand der Technik ist. Der Einsatz von CO<sub>2</sub> bei der Methanolsynthese ist daher Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten vieler Arbeitsgruppen und wird mit unterschiedlichen Lösungsansätzen verfolgt. Als Teil der am EBI ceb laufenden Arbeiten

hierzu wurde in 2018 mit Experimenten zur Auswahl und zum Test von geeigneten Katalysatoren und Wärmeträgerfluiden für die Dreiphasen-Methanolsynthese begonnen. Erste erfolgversprechende Kombinationen wurden identifiziert und diese werden zum jetzigen Zeitpunkt u. a. in Langzeitversuchen weiter untersucht. Parallel zu den grundlegenden experimentellen Arbeiten wurden mögliche Reaktorkonzepte und -verschaltungen mit Hilfe geeigneter Simulationsmodelle untersucht und bewertet. Zusätzlich wurde die Möglichkeit der quantenmechanischen Berechnung von Gaslöslichkeiten überprüft. Leider zeigte sich, dass die Abweichungen zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten bis zu 100 % betragen können und die Vorausberechnung keine absoluten Werte, sondern nur Aussagen zur relativen Bewertung verschiedener Löslichkeiten zueinander liefern kann.

Da die Kenntnis der Gaslöslichkeiten von Edukten und Produkten in der vorliegenden Flüssigphase für Dreiphasen-Reaktionen von entscheidender Bedeutung ist, werden die theoretischen und experimentellen Arbeiten hierzu weiter intensiviert. Speziell die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik der DVGW-Forschungsstelle am EBI verfügt über die hierfür nötige langjährige Erfahrung und experimentelle Ausstattung und im Rahmen gemeinsamer Forschungsprojekte werden die bei beiden Einheiten verfügbaren Kompetenzen gebündelt. Weiterhin bestehen auf dem Gebiet Methanolsynthese seit 2018 auch enge Kontakte zum Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg in Form einer gemeinsam betreuten Promotionsarbeit zur Verfahrensentwicklung einer dynamisch betreibbaren Methanolsynthese im Festbett.

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

### 1.3.3 Arbeitsgruppe physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung

Frank Graf, Felix Ortloff, 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 Bio-

methan 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**

Im Rahmen des 2018 gestarteten BMWi-Leitprojektes „MethQuest“ wird im Verbund „MethFuel“ die innovative Methanerzeugung auf Basis erneuerbarer Energiequellen (EE-Methan) untersucht. Hierbei soll Methan aus elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid in einer katalytischen 3-Phasen Methanisierung (3PM) erzeugt werden. Die Bereitstellung des CO<sub>2</sub> aus Rauchgasen oder aus der Umgebungsluft wird hierbei über die am EBI entwickelte isotherme chemische Wäsche auf Basis von ionischen Flüssigkeiten (ILs) realisiert. Dieses Verfahren, welches auf chemisch-funktionalisierten Waschflüssigkeiten basiert, wurde in den letzten Jahren sowohl verfahrenstechnisch als auch stofflich optimiert und die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Biogas im Rahmen eines Feldversuchs erfolgreich demonstriert. Für die Umstellung des Verfahrens zur Abscheidung aus anderen CO<sub>2</sub>-haltigen Gasen, wie es im Projekt „MethQuest“ vorgesehen ist, sind jedoch weitere Optimierungen, besonders im Absorptionsprozess, nötig. In **Bild 1.7** ist das Verfahrensfließbild zur innovativen Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Umgebungsluft dargestellt. Neben der Auswahl und Charakterisierung von geeigneten ILs für den jeweiligen Anwendungsfall (siehe Projekt „RECODE“) liegt der Schwerpunkt im Projekt „MethQuest“ besonders auf grundlegenden Untersuchungen zu den Themen Hydrodynamik und flüssigkeitsseitigem Stofftransport in Füllkörper- und Packungskolonnen.

Die im Vergleich zu Wasser hohe Viskosität und niedrige Oberflächenspannung von ILs führen in der Regel 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, Rinsale, 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 Mackowiak<sup>2</sup>).

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

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

Diese sind somit aufgrund der sich stark unterscheidenden Stoffeigenschaften nicht für ILs anzuwenden. Um den Stofftransport mit ILs bei der Absorption von CO<sub>2</sub> in ausreichender Güte modellieren zu können, sind weitere experimentelle Untersuchungen mit höherviskosen Modellmedien notwendig. Durch wässrige Glycerinlösungen mit variierender Glycerinkonzentration kann der Einfluss der Viskosität unabhängig von der Oberflächenspannung studiert werden. Die Charakterisierung der Stoffeigenschaften der Modellmedien geschieht in Zusammenarbeit mit dem Brennstofflabor des EBI ceb.

Für die Untersuchung von Hydrodynamik und Stofftransport bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird derzeit im neuen Technikum des EBI ceb eine Versuchsanlage mit einer DN250-Absorptionskolonne aufgebaut. Die Anlage misst den Flüssigkeitsrückstand in der Kolonne in Abhängigkeit der eintretenden Masseströme und ist außerdem in der Lage, durch gravimetrische Messungen den Tropfenanteil der flüssigen Phase zu bestimmen. Neben Erfahrungswerten aus eigenen Versuchskampagnen orientiert sich der neue Aufbau auch an der im Oktober 2018 erschienenen VDI-Richtlinie 2761 Blatt 2 „Thermische Trennverfahren in der Verfahrenstechnik; Messung und Auswertung von Fluidodynamik und Stofftransport in gepackten Kolonnen“. Eine vorgeschaltete Kolonne dient zur Untersuchung des Einflusses der Vorsättigung des Gasstroms auf den Absorptionsprozess. Eine präzisere Erfassung des Flüssigkeitsrückstands wird durch eine magnetorestriktive Füllstandsmessung umgesetzt. Um Stoffeigenschaften wie Viskosität, Dichte und Oberflächenspannung ändern zu können, ohne das Modellmedium wechseln zu müssen, soll die Temperaturabhängigkeit dieser Stoffeigenschaften durch Integration eines Flüssigkeitskreislaufs mit Wärmeübertrager ausgenutzt werden. Im Rahmen des Projekts werden gezielt strukturierte Packungen (Mellapak™ 250Y, Sulzer) als Kolonneneinbau untersucht. Sie weisen gegenüber Füllkörperschüttungen bei größerer spezifischer Oberfläche einen geringeren Druckverlust auf. Dies ist für den Anwendungsfall der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Luft besonders wichtig, da hier aufgrund des geringen Anteils an CO<sub>2</sub> in der Luft (ca.  $y_{\text{CO}_2} = 400 \text{ ppm}$ ) höhere Volumenströme erforderlich sind, um eine ausreichende Menge an CO<sub>2</sub> für die 3PM zur Verfügung stellen zu können.

### Hydrodynamik und Stofftransport in Blasen-säulenreaktoren

Blasen-säulenreaktoren werden häufig in der chemischen, biotechnischen und petrochemischen Industrie eingesetzt. Neben der einfachen Bauweise bietet dieser Reaktortyp gegenüber anderen Reaktorkonzepten Vorteile hinsichtlich der Temperaturkontrolle und der Katalysatorausnutzung. Im Zuge der Energiewende wird der Einsatz von Blasen-säulenreaktoren beispielsweise für die Ver-

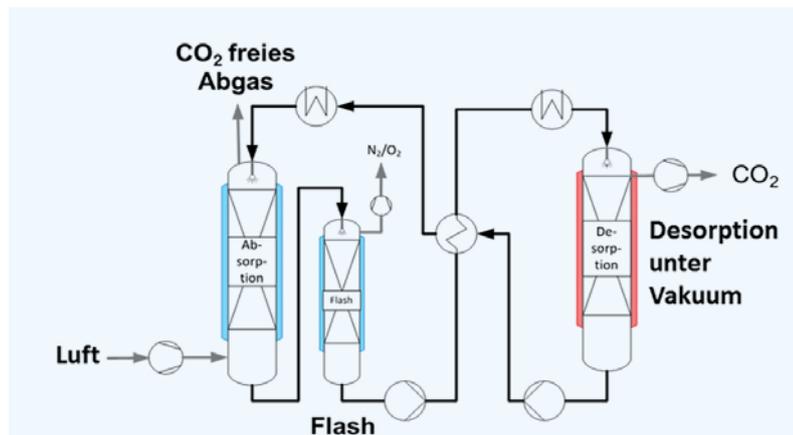


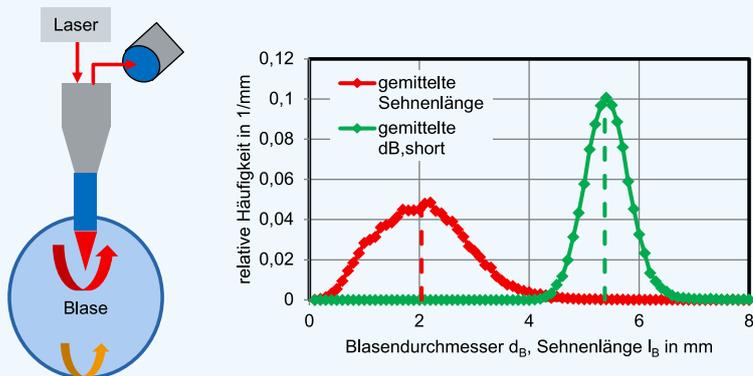
Bild 1.7: Verfahrensfließschema zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Umgebungsluft

fahren der Fischer-Tropsch-Synthese sowie der katalytischen und biologischen Methanisierung am EBI ceb untersucht. Bei diesen Verfahren werden die gasförmigen Edukte CO/CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> am Gasverteiler in der Flüssigphase dispergiert und die entstehenden Blasen steigen im Reaktor nach oben auf. Aus der Gasphase werden die Edukte über die Flüssigphase an den Katalysator transportiert und reagieren an diesem ab. Bei der Reaktorauslegung ist neben der chemischen Reaktion an der Katalysatoroberfläche der Stofftransport aus der Gasphase in die Flüssigphase entscheidend (siehe Gl. (1.1)), welcher neben dem treibenden Konzentrationsgefälle vom volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten  $k_L a$  bestimmt wird.

$$\frac{\dot{n}_{i, \text{GL}}}{V_R} = (k_L a)_i \cdot \left( \frac{p_i \cdot p_L}{H_{iL}} - c_{iL} \right) \quad (1.1)$$

Die Beschreibung des Gas-/Flüssig-Stofftransportkoeffizienten setzt die Vorhersage der Hydrodynamik (Blasengröße  $d_B$ , Blasengeschwindigkeit  $u_B$ , relativer Gasgehalt  $\epsilon_G$ ) der Blasenströmung voraus. Diese basiert bisher auf der Anwendung von empirischen Korrelationen für integrale Größen. Zum besseren Verständnis der hydrodynamischen Vorgänge und für eine erhöhte Verlässlichkeit der Auslegungskriterien von Blasen-säulenreaktoren werden am EBI ceb die lokalen Vorgänge in Blasenströmungen (z. B. Blasenbildung, -koaleszenz und -zerfall) detailliert untersucht. Hierzu werden neben der Messung des integralen relativen Gasgehalts lokale Messungen der Blasen-größe, Geschwindigkeit und des Gasgehalts in Blasenströmungen durchgeführt.

Da die optische Zugänglichkeit der Blasenströmung bei hoher Blasendichte (Relativer Gasgehalt  $\epsilon_G > 5 - 10 \%$ ) und bei Einsatz von Suspensionen stark eingeschränkt ist, wird zu lokalen Messungen in Blasenströmungen eine optische Nadelsonde eingesetzt (Bild 1.8, links), welche eine konische Spitze ( $d_{\text{Glas}} = 125 \mu\text{m}$ ) aus Glas hat. Über ei-



**Bild 1.8:** Links: Aufbau und Funktionsweise der optischen Nadelsonde zur Bestimmung der Blasengrößenverteilung; Rechts: Vergleich der Verteilung der Sehnenlängenmessung mittels Nadelsonde und optisch ermittelter Blasengröße

nen Lichtleiter wird Laserlicht in die Glasspitze eingekoppelt, welches zum Teil an der Spitze reflektiert wird. Dabei hängt die Intensität der Reflektion vom Brechungsindex des die Spitze umgebenden Fluides ab. Über die Messung der Reflektion 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 Blaugeschwindigkeit und durchstochene Sehnenlänge  $l_B$  ermittelt werden. Zur Validierung der Nadelsondenmesstechnik wurden umfangreiche optische Messungen im Durchlichtverfahren an Einzelblasen durchgeführt. Die Blasaufstiegsgeschwindigkeit wurde mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera gemessen und der Blasendurchmesser konnte aus der Projektionsfläche bestimmt werden. Der Vergleich zwischen der Nadelsonde und den optischen Messverfahren zeigt, dass die Blaugeschwindigkeit mit einer Abweichung von weniger als 10 % bestimmt werden kann. Der Vergleich der Blasengrößenmessungen zeigt weiterhin, dass die Nadelsonde kleinere Blasengrößen misst (**Bild 1.8**, rechts). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Blasen im Aufstieg eine waagerechte elliptische Form aufweisen und daher die durchstochene Sehnenlänge immer kleiner ist als der äquivalente Blasendurchmesser. Es konnte aber gezeigt werden, dass über die Messung der Sehnenlänge die Veränderung der Blasengröße qualitativ bestimmt werden kann.

Auf Basis dieser Voruntersuchungen wurden erste Messungen in einer Blasenströmung im Stoffsystem Wasser/Luft durchgeführt ( $d_R = 100$  mm,  $T = 20$  °C,  $p = 1$  bar). Es konnte gezeigt werden, dass das Auftreten von Blasenkoaleszenz innerhalb der Blasenströmung über die Messung mit der optischen Nadelsonde nachzuweisen ist.

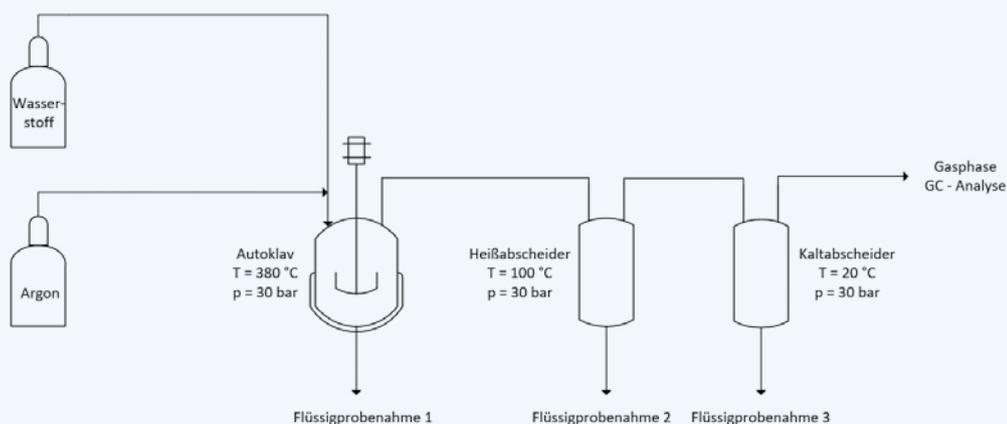
Mit der Nadelsonde, die nur eine geringe Beeinflussung auf die Blasenströmung hat, sind im Gegensatz zu optischen Messtechniken auch Untersuchungen in opaken Medien bei hohen Gasgehalten möglich. Damit können zusätzlich zu den integralen Gasgehaltsmessungen auch lokale Blasengrößen und -geschwindigkeiten unter Druck sowie in Systemen mit Feststoffbeladung bestimmt werden. Diese Messtechnik stellt somit die Grundlagen, um den Zusammenhang zwischen dem relativen Gasgehalt und den lokalen Vorgängen in Abhängigkeit von Druck und Feststoffbeladung detailliert zu untersuchen.

#### 1.3.4 Arbeitsgruppe Katalytische Synthesen/chemische Energiespeicherung/neue Bioenergieträger Reinhard Rauch, Philipp Neuner

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag 2018 im Bereich Konversion von Fischer-Tropsch-Wachsen zu Kerosin und/oder Chemikalien. Hier wurden erfolgreich Versuche zum Hydroprocessing im Slurryreaktor durchgeführt. Es wurde Wachs in der Flüssigphase vorgelegt und mit Wasserstoff bei 30 bar und 380 °C in Gegenwart von einem suspendierten Katalysator durchströmt. Eine Auftrennung der Produktströme erfolgt durch mehrere Kondensatabscheidebehälter bei unterschiedlichen Temperaturen.

Der Betrieb des Slurryreaktors erfolgt derzeit im Batchmodus. So kann die vorgelegte Flüssigphase auf den gewünschten Kettenlängenbereich gecracked werden. Hierdurch lassen sich Parameter wie Viskosität oder Siedebereich anpassen. Es konnten Produktspektren von strukturviskosem, streichbarem Wachs über geleeartiges Fluid bis zu leichtsiedender Flüssigkeit hergestellt werden. Der Anteil an Isomeren konnte im Vergleich zum Eduktwachs stark erhöht werden (vgl. **Bild 1.10**), dies ist insbesondere bei der Verwendung als Kerosin (nach Produktauftrennung für kürzere KWs) oder Schmiermittel entscheidend. Ein großer Nachteil des herkömmlichen Hydroprocessings im Festbettreaktor ist die Erzeugung von Olefinen als Intermediat im Prozess. Diese neigen zur Alterung der Produkte, was einer Wertminderung im späteren Lebenszyklus gleichkommt. Olefine sind auch im Slurryreaktor nicht zu vermeiden, allerdings lassen sich diese durch ein Absenken der Temperatur im Reaktor in situ rehydrieren, was die Alterung unterbindet.

Ein weiterer Vorteil des Slurryverfahrens ist der stark reduzierte Kontakt von Gasphase mit Katalysator. So werden leichtsiedende Kohlenwasserstoffe durch konstantes Durchströmen mit Wasserstoff aus dem Reaktor ausgetragen. Dies wirkt dem Cracken zu kurzkettigen Gasen entgegen. Gleichzeitig lässt sich so durch die Prozessparameter im Reaktor das Siedeverhalten der abzuscheidenden Fraktion bestimmen. Bei den oben genannten Bedingungen entspricht das einer Abscheidung bis zu



**Bild 1.9:** Prozessfließbild Autoklavreaktor (Slurryreaktor)

einer Kettenlänge von ca. C9. Dies konnte auch durch GC-Messungen bestätigt werden. Ziel für das Jahr 2019 ist es, die Menge an hergestellten Leichtsiedern so weit zu erhöhen, dass übliche Kraftstoffprüfverfahren wie beispielsweise Flammpunkt, Siedelinie und gegebenenfalls Oktanzahl durchgeführt werden können.

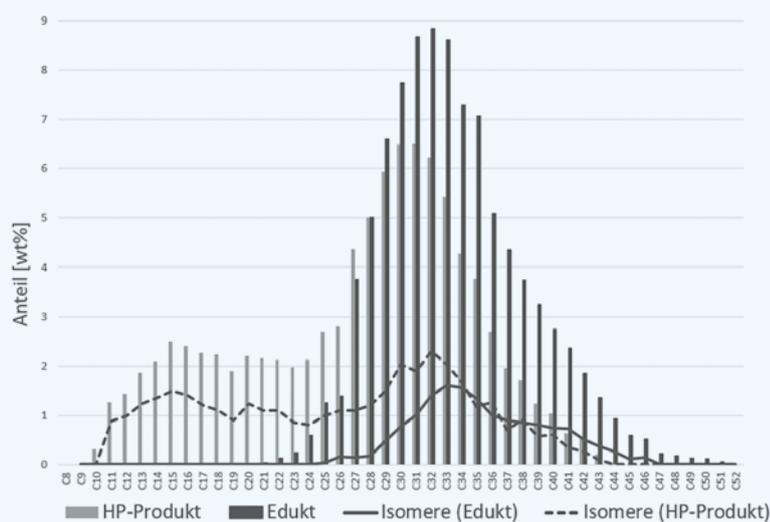
Außerdem wurden im Jahr 2018 die Planung und Großteile der Konstruktion des Hochdruck-Festbettreaktors abgeschlossen. Dieser soll das einstufige Hydroprocessing von FT-Wachsen bis hin zu 500 °C und 200 bar, im kontinuierlichen Betrieb, ermöglichen. Die Inbetriebnahme der Anlage ist für April 2019 geplant (**Bild 1.11**).

Ein weiteres Themengebiet war die Fortführung der Beratung und Unterstützung der Industrie bei der Implementierung von Synthesegaskonversionsanlagen. Die Anlage in Nongbua, Thailand konnte nach einigen Optimierungen in den kontinuierlichen Dauerbetrieb überführt werden, damit produziert die Anlage aus lokaler holzartiger Biomasse ca. 1 MW Strom. Parallel zum Dauerbetrieb werden auch Brennstofftests durchgeführt, wobei verschiedene lokale Brennstoffe, wie z. B. „empty fruit bunches“ auf ihre Eignung zur Vergasung in der Wirbelschicht untersucht werden. Eine zweite baugleiche Anlage ist derzeit in Daigo, Japan, im Bau. Hier ist die Inbetriebnahme für 2019 geplant.

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

Frank Graf, Wolfgang Köppel, Felix Ortloff, Jochen Schütz, Andreas Strauß

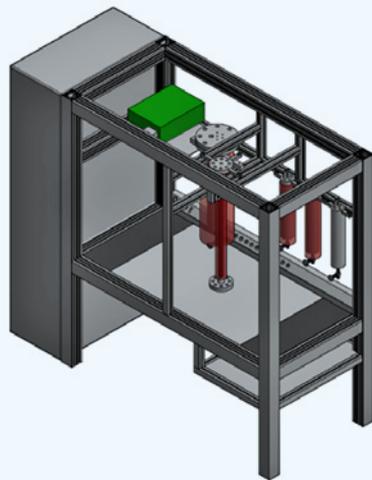
Die Schwerpunkte des Bereichs Gastechnologie liegen in der verfahrens- und systemtechnischen Bearbeitung von gas- und brennstofftechnischen Fragestellungen. Hierzu gehören Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die in den Arbeitsgruppen „Systeme und Netze“ sowie „Verfahrenstechnik“ bearbeitet werden, ebenso wie Kontroll-



**Bild 1.10:** Vergleich der Ergebnisse der Hydroprocessing-Versuche im Slurryreaktor mit Eduktwachs; aufgetragen nach 48h Versuchszeit (HP-Produkt) und Anteil der isomerisierten Kohlenwasserstoffe

und Überwachungsaufgaben bei Gasversorgern und Industrieunternehmen. Zum Bereich gehören auch die akkreditierten Laboratorien Materialprüfung und Brennstoffanalytik.

Die enge Verbindung zwischen dem Bereich Gastechnologie der DVGW-Forschungsstelle, DVGW gt und dem Teilinstitut Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie, EBI ceb zeigt sich auch darin, dass ein großer Teil der unter Abschnitt 1.3 Laufende wissenschaftliche Arbeiten aufgeführten Forschungsarbeiten zusammen mit dem Bereich Gastechnologie durchgeführt werden. Während am Lehrstuhl der Fokus auf den wissenschaftlichen Grundsatzfragen liegt, wird bei der Forschungsstelle der Schwerpunkt auf die Prozessintegration und Überführung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die praktische Anwendung



**Bild 1.11:** Links: 3D-Modell des Hochdruck-Festbettreaktors; rechts: Blick in die Anlage mit Reaktor und Abscheidebehältern

gelegt. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung der Wabenmethanisierung, die in mehreren gemeinsamen Forschungsprojekten untersucht wird. Hier ist der Bereich Gastechnologie für den Betrieb einer Pilotanlage federführend zuständig und übernimmt auch das Monitoring der im Rahmen des EU-Projektes „STORE&GO“ ([www.storeandgo.info](http://www.storeandgo.info)) betriebenen Demonstrationsanlage in Falkenhagen.

Auch 2018 war DVGW gt maßgeblich an der weiteren Gestaltung der DVGW-Innovationsforschung beteiligt. Es wurden beispielsweise neue Projekte zur Bestimmung von Potenzialen für die Erzeugung von Gasen aus erneuerbaren Quellen und zu verfahrenstechnischen Fragestellungen zur Gaserzeugung und Aufbereitung bearbeitet. Außerdem wurden die Themengebiete „LNG“ und „Mobilität“ weiter ausgebaut, u. a. wurde eine DVGW-Studie zum Vergleich von PtX-Kraftstoffoptionen abgeschlossen. Als weiteres Großprojekt im Bereich PtG wurde das BMWi-Leitprojekt MethQuest ([www.methquest.de](http://www.methquest.de)) im Sommer 2018 gestartet. Methanbasierte Kraftstoffe aus regenerativen Quellen können einen wichtigen Beitrag zur Senkung der CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen leisten. MethQuest entwickelt hierbei Technologien, durch die methanbasierte Kraftstoffe aus erneuerbaren Quellen gewonnen und in mobilen sowie stationären Anwendungen genutzt werden können. MethQuest untergliedert sich in sechs Verbundvorhaben. Im Verbundvorhaben MethFuel werden neuartige verfahrenstechnische Konzepte zur H<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Bereitstellung und zur katalytischen Methanisierung entwickelt, die deutliche Vorteile im Vergleich zum Stand der Technik aufweisen. Im Verbundvorhaben MethCar wird ein neuartiges Pkw-Gasmotorkonzept mit besonders hoher Effizienz entwickelt. Gegenstand von MethPower sind zwei neuartige Motorenkonzepte. Zum einen wird die effiziente Koppelung der Herstellung und Nutzung von Methan untersucht,

zum anderen wird die Frage geklärt, wie Wasserstoff in Großmotoren direkt eingesetzt werden kann. Im Verbundvorhaben MethMare werden zwei Konzepte für schnelllaufende und dynamisch betreibbare Gasmotoren für die Schifffahrt untersucht und deren technologisches, ökologisches und wirtschaftliches Potenzial analysiert. Im Verbundvorhaben MethGrid werden erzeugungs-, netz- und verbrauchsseitige Lösungen zur Gestaltung von Microgrids für Binnen- und Seehäfen entwickelt. Eine verbundübergreifende systemanalytische Bewertung hinsichtlich Kosten, Klimawirkung und Umsetzbarkeit erfolgt im Verbund MethSys. Das Vorhaben, an dem 27 Projektpartner aus Forschung, Industrie und Energiewirtschaft beteiligt sind, hat ein Gesamtvolumen von € 32 Mio. und wird vom BMWi mit insgesamt € 19 Mio. gefördert. Die gemeinsame Leitprojektkoordination übernehmen Rolls-Royce Power Systems und DVGW gt.

#### 1.4.1 Arbeitsgruppe „Systeme und Netze“

Wolfgang Köppel, Christian Bidart, Maximilian Heneka, Christian Hotz, Volkan Isik, Kerstin Kröger, Praseeth Prabhakaran, Johannes Ruf, Azif Zubair

Die systemische Bedeutung von Gas im zukünftigen defossilisierten Energiesystem wird in der Arbeitsgruppe „Systeme und Netze“ (AG-SN) untersucht. 2018 lagen die Schwerpunkte der Arbeiten in den Themengebieten „Sektorenkopplung“, „Gasinfrastruktur der Zukunft“ und „Gasmobilität“.

Im Untersuchungsschwerpunkt „Sektorenkopplung“ wurde das vom BMWi geförderte Forschungsvorhaben RegEnKibo (Regionalisierung der Energieversorgung auf Verteilnetzebene am Modellstandort Kirchheimbolanden) abgeschlossen. RegEnKibo beschäftigte sich schwerpunktmäßig mit der Simulation des Energiesys-

tems der Energiezelle Kirchheimbolanden. Hierfür wurden die Sektoren Strom, Wärme und Gas unter Beachtung der Mobilität in die Einzelmodelle PtG-Anlage, Gebäude mit Gebäudeenergiesystemen, KWK, Strom- und Gasverteilnetze geclustert und in Simulationsmodellen abgebildet. Diese Teilmodelle wurden in einem zweiten Schritt innerhalb eines virtuellen Kraftwerks in einer Co-Simulation zusammengeführt und mit Hilfe von Optimierungsroutinen auf Basis von verschiedenen Szenarien hinsichtlich einer maximalen Ausnutzung der in Kirchheimbolanden lokal erzeugten erneuerbaren Energie untersucht. Als Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass die lokale Nutzung der in Kirchheimbolanden erzeugten erneuerbaren Energien ohne wesentlichen Ausbau des überregionalen Stromnetzes und ohne signifikante Abregelung mit Hilfe der Sektorenkopplung bei Erhaltung einer hohen Versorgungssicherheit erreicht werden kann.

Ebenfalls in diesem Untersuchungsschwerpunkt wurde das DVGW-Forschungsvorhaben Potenzialermittlung zur Erzeugung erneuerbarer Gase mittels Methanisierung (EE-Methanisierung) mit dem Ziel untersucht, den existierenden Biogasanlagen nach Auslaufen der EEG-Förderung Möglichkeiten zur Weiternutzung unter Beachtung der Stromnetzdienlichkeit via PtG-Einbindung aufzuzeigen. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde ein Gesamtpotenzial von Biogas und synthetischem Erdgas, das über PtG-Kopplung erzeugt wird, von ca. 16,7 Mrd. m<sup>3</sup>/a (NTP) in Deutschland identifiziert. Darin enthalten sind die bereits heute erzeugten Methanmengen. Der PtG-Anteil beträgt über 7 Mrd. m<sup>3</sup> i.N./a (**Tabelle 1.2**). Zukünftig liegen die Gestehungskosten zwischen 7,3 und 7,9 ct/kWh. Allerdings müssen zur praktischen Umsetzung politische Rahmenbedingungen geschaffen werden.

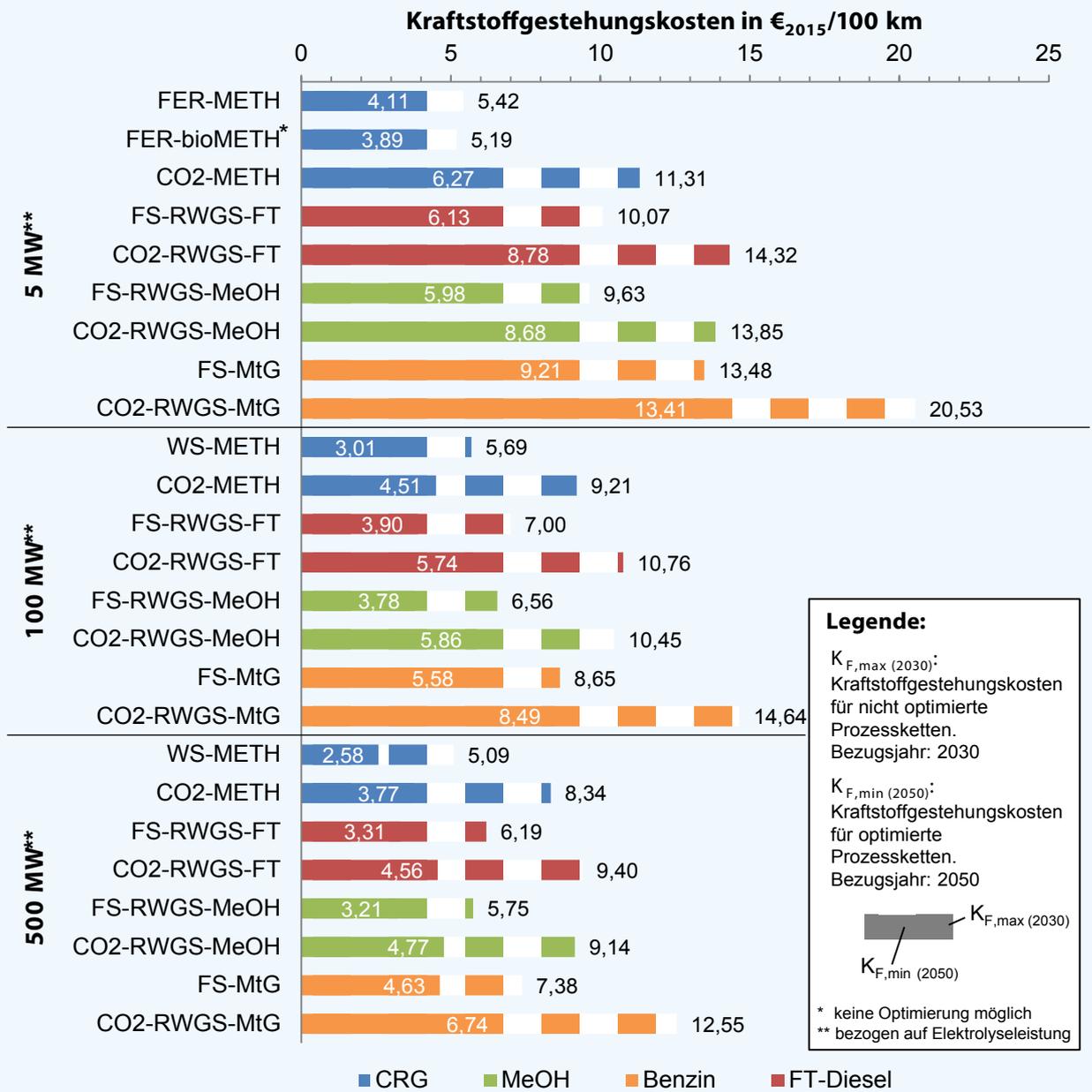
Der Themenkomplex „Gasinfrastruktur der Zukunft“ wird exemplarisch durch das BMBF-geförderte Kopernikus-Projekt ENSURE repräsentiert. Gegenstand dieses Projektes ist die Entwicklung von neuen Netzstrukturen im Zuge der Energiewende. DVGW untersucht im Projekt den möglichen Beitrag der Gasinfrastruktur als flexible Sektorenkopplungsoption zur Reduktion der THG-Emissionen und der Gewährleistung der Versorgungssicherheit durch z. B. die zeitliche/räumliche Entkopplung der Energiebereitstellung und des Energiebedarfs sowie der Speicherung von Energie. Hierbei werden Detailinformationen aus Gasverteilnetzrechnungen, die auf Basis von Szenarien gekoppelt in einer Co-Simulation mit detaillierten Stromverteilnetzrechnungen erhalten werden, in die systemische Betrachtung einer Energiezelle überführt. In dieser systemischen Betrachtung können dann dynamische Sektorenkopplungseffekte bewertet werden. Aus beiden Betrachtungen können weiterhin Aus- und Umbaumaßnahmen des Gasnetzes, Speicherkapazitäten in den einzelnen Sek-

toren sowie Stromanschlussleistungen für Quartiere und Energiezellen abgeleitet werden.

Die Thematik „Gasmobilität“ wird exemplarisch anhand der beiden Forschungsvorhaben „Vergleichende Bewertung von PtX-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen“ (DVGW) und „Bewertung und Wissenschaftliche Begleitung eines Demonstrationsprojektes zum Einsatz von LNG als Kraftstoff für LKW“ (BMVI) beschrieben. Im Forschungsvorhaben PtX werden PtL- und PtG-Prozesse vergleichend nebeneinandergestellt, um auf Basis einer technischen Detailbeschreibung der Prozesse die Gestehungskosten und die Prozesswirkungsgrade zu ermitteln. Hierbei zeigt sich, dass hohe Wirkungsgrade insbesondere bei methanbasierten Prozessen zu erzielen sind. So erreicht z. B. die CRG-Bereitstellung (CRG: Compressed Renewable Gas) über die Wirbelschichtvergasung (WS) von Biomasse mit nachgeschalteter katalytischer Methanisierung in der Konfiguration ohne interne Wärmeintegration einen Wirkungsgrad von 61 %. Werden die nutzbaren Abwärmeströme prozessintern in eine SOEC-Elektrolyse integriert, steigt der Wirkungsgrad auf 75 % an. Bei den Flüssigkraftstoffen werden hohe Wirkungsgrade von den Methanol-(MeOH) und Fischer-Tropsch-Diesel- (FT)-Prozessketten bei der C-Bereitstellung via Flugstromvergasung (FS) erreicht. Die maximalen Wirkungsgrade liegen hier bei 58 % (FS-MeOH). Mit steigender Prozesskomplexität nehmen die Wirkungsgrade ab. Besonders deutlich ist dies an den mehrstufigen Prozessketten zur Bereitstellung von OME und von Benzin z. B. über die Methanol-to-Gasoline-Synthese (MtG) zu erkennen, die energetische Wirkungsgrade zwischen 30 und 41 % erreichen. Die Wirkungsgrade fließen in den ökonomischen Vergleich ein, der die Abschätzung der Kraftstoffgestehungskosten für die Jahre 2030 und 2050 beinhaltet (**Bild 1.12**). Hierzu wurden die kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten der Prozessketten für jeweils drei verschiedene Elektrolyseleistungen (5 MW, 100 MW und 500 MW) ermittelt und mit den zugehörigen Transport- und Tankstellenkosten verknüpft. Anschließend wurden auf Basis eines Referenz-PKW-Modells der Kompaktklasse die spezifischen Kraftstoffkosten (ohne Fahrzeugkosten) pro gefahrenen Kilometer für die Jahre 2030 und 2050 berech-

**Tabelle 1.2:** SNG-Potential aus Biogasanlagen in Deutschland

	Potenzial in Mrd. m <sup>3</sup> /a (NTP)
Biogas (CH <sub>4</sub> ) Einzelanlage	9,24
Biogas (CH <sub>4</sub> ) Sammelleitung	0,18
Methanisierung	7,25
<b>Summe</b>	<b>16,68</b>



**Bild 1.12:** Kraftstoffgestehungskosten für verschiedene PtX-Prozessketten

net. CRG-Prozesse stellen bei allen betrachteten Anlagengrößen die kostengünstigste PtX-Kraftstoffvariante dar. Für die biogenen Prozessketten liegen die Kraftstoffgestehungskosten im Jahr 2030 bei 5-6 €/100 km, bei den CO<sub>2</sub>-Prozessketten bei 8-12 €/100 km. 2050 sinken die Kosten um über 50 % auf minimal ca. 2,6 €/100 km. Die PtL-Kraftstoffe liegen 2030 ca. 15 % und 2050 ca. 24 % höher im Vergleich zu den CRG-Prozessen.

Bei dem BMVI-geförderten Forschungsvorhaben LNG-LKW wurden ein Testbetrieb von 20 LNG-LKWs im Vergleich zu Diesel-LKWs begleitet und die CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgenommen. Die 20 eingesetzten LNG-LKW legten in den 13 Monaten insgesamt 2,3 Mio. km mit einem

LNG-Durchschnittsverbrauch von 23,7 kg/100 km zurück. Gegenüber den 20 äquivalenten Dieselfahrzeugen, die einen durchschnittlichen Verbrauch von 31 l/100 km aufwiesen, konnten ca. 360 t CO<sub>2</sub> eingespart werden. Dies entspricht einer Einsparung von ca. 20 % (Tank-to-Wheel). Zur direkten Vergleichbarkeit der Technologien wurden drei Referenzfahrten durchgeführt, bei denen jeweils ein LNG-Fahrzeug zusammen mit einem äquivalenten Dieselfahrzeug dieselbe Strecke unter gleichen Rahmenbedingungen (u. a. Beladung) zurücklegte. Hierbei ergab sich eine durchschnittliche Senkung der CO<sub>2</sub>-Emission von 11,6 % (Tank-to-Wheel). Fahrerbefragungen, die zu Beginn und zum Ende des Projekts durchgeführt wurden,

ließen keine Vorbehalte gegenüber den LNG-LKW erkennen. Insbesondere die für den täglichen Betrieb relevanten Parameter Leistung, Reichweite und Zuverlässigkeit wurden sehr positiv gesehen. Des Weiteren wurden die Sicherheit und auch der Betrieb der Fahrzeuge und der Tankstellen sowie das ruhigere und leisere Fahren mit den Erdgasfahrzeugen positiv bewertet. Die momentan noch höheren Kosten der LKW können innerhalb von 2-5 Jahren kompensiert werden.

#### 1.4.2 Arbeitsgruppe „Verfahrenstechnik“

Felix Ortloff, Katharina Bär, Johanna Gegenheimer,  
Peter Kussin, Friedemann Mörs,  
Christian Müller, Johannes Schäffer

Die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik (AG-VT) beschäftigt sich mit der Erzeugung, Aufbereitung und Umwandlung von gasförmigen Brennstoffen aus erneuerbaren Quellen (z. B. Biogas, H<sub>2</sub> oder synthetisches Erdgas). Innerhalb der AG-VT werden experimentelle und theoretische Arbeiten zu den Themen biologische bzw. thermochemische Gaserzeugung, Gasreinigung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung und biologische bzw. katalytische Methanisierung durchgeführt.

Im Arbeitsfeld biochemische Gaserzeugung werden bereits seit mehreren Jahren in enger Kooperation mit der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB) in Hohenheim biologische Verfahren zur Erzeugung von Methan untersucht, darunter Ansätze zur biologischen Methanisierung von H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Gemischen in Blasensäulen- und Rieselbettreaktoren sowie Arbeiten zu einem neuartigen Biogaserzeugungsverfahren, der sog. 2-stufigen Druckfermentation. Zur biologischen Methanisierung wurden im Rahmen eines vom Ministerium für Wissenschaft und Kunst des Landes Baden-Württemberg geförderten Verbundprojekts technische Modellierungen zu verschiedenen Umsetzungskonzepten durchgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse konnte bewertet werden, wie das Verfahren in bestehende Biogasanlagen integriert werden kann. In einer anschließenden ökonomischen Analyse der Integrationskonzepte wurden die Kosten der kombinierten SNG-Erzeugung aus Biomasse und EE-Strom zu ca. 10-12 €/kWh ermittelt. Im Bundesland Baden-Württemberg existieren über die untersuchte Route Biomethanpotenziale von 10-17 TWh/a. In Abhängigkeit der zukünftigen Entwicklung des Gasmarktes in Baden-Württemberg lässt sich mit diesen Mengen ein Anteil des für das Jahr 2050 erwarteten Gasbedarfs von ca. 20 % decken.

Nach fünf Jahren erfolgreicher Zusammenarbeit von DVGW-EBI, Universität Hohenheim und der Universität Mainz wurde das Projekt „Autogenerative Two-Phase High Pressure Fermentation – Integrative Biogaserzeugung und Aufbereitung zur Einspeisung in Hochdruck-

Erdgasnetze“ (AG-HiPreFer) erfolgreich abgeschlossen. Ziel des Projekts war es, die bisher getrennten Prozessschritte Biogaserzeugung, Aufbereitung und Druckerhöhung in einem Verfahren zu integrieren und energetisch und wirtschaftlich zu optimieren. Im Projekt wurde die zweistufige Druckfermentation weiterentwickelt und hochkalorisches Biogas mit einem Methangehalt von 93 Vol.-% bei einem Druck von bis zu 75 bar produziert. Parallel dazu wurde die Modellierung des Verfahrens verfeinert und begleitende experimentelle Untersuchungen, z. B. zu Gaslöslichkeiten, durchgeführt. Im Ergebnis konnten die Modellierung des Verfahrens und die experimentellen Ergebnisse mit guter Übereinstimmung zusammengeführt werden und belastbare Aussagen über Energie- und Betriebsmittelbedarfe sowie über zu erwartende Methangestehungskosten getroffen werden. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse wurden Folgevorhaben zu weiteren Fragestellungen, darunter zur Flexibilisierung der Gaserzeugung und zur Demonstration des Prozesses in größerem Maßstab, beantragt.

Im Arbeitsfeld Gasaufbereitung wurden im AIF-Verbundvorhaben „Entwicklung innovativer, hocheffizienter Technologien zur Aufbereitung von Biogas/ Biomethan über die komplette Wertschöpfungs- und Verwertungskette“ (inTeBi) verschiedene Verfahrenskonzepte zur Entfernung von siliziumorganischen Verbindungen, Schwefelkomponenten und Sauerstoff aus Biogas untersucht und die entsprechenden Teilprojekte im Jahr 2018 erfolgreich abgeschlossen. Innerhalb des Teilprojektes DeSiBio wurde die Eignung eines Analysekonzepts (Probenahme und Analysetechnik) zur Charakterisierung von Gasmischungen hinsichtlich der Beladung mit siliziumorganischen Verbindungen untersucht. Dazu wurden in Labor- und Feldversuchen Beladungskapazitäten von Aktivkohlen, die als praxisnahe Richtwerte verstanden werden können, ermittelt. Die Projektergebnisse erlauben eine verbesserte Auslegung von adsorptiven Trennstufen in Abhängigkeit der realen Siliziumlast des Gasstromes, wodurch sich niedrigere Verfahrenskosten und eine verbesserte Wirtschaftlichkeit ergeben. Mit dem Ziel, die Kosten für die Biogaserreinigung zu minimieren, wurden innerhalb des inTeBi-Teilprojektes EffenSorb eisenhaltige Materialien (Oxide und Hydroxide) untersucht, welche neben der Entschwefelung (Eisensulfidbildung) auch zur Sauerstoffentfernung (Oxidation des Sulfides, elementarer Schwefel entsteht) geeignet sind. Des Weiteren wurden neue Materialien entwickelt, die sich durch eine erhöhte Schwefel- bzw. Sauerstoffbeladung (Steigerung der Schwefelbeladung > 300 %) gegenüber kommerziellen Materialien auszeichnen. Kann das für den Prozess geforderte, stöchiometrische H<sub>2</sub>S/O<sub>2</sub>-Verhältnis sichergestellt werden, bietet das neu entwickelte Verfahren Vorteile gegenüber etablierten Möglichkeiten, wie durch Versuche an einem

kleintechnischen Demonstrator gezeigt werden konnte. Im inTeBi-Teilprojekt KatMOx wurde von Projektpartnern ein kostengünstiges Katalysatormaterial für die katalytische Sauerstoffentfernung mittels Methanoxidation entwickelt. Dass dieses bei geeigneter Vorbehandlung auch unter realen Bedingungen dazu geeignet ist, den Sauerstoffgrenzwert für die Biogaseinspeisung (10 ppmv in Netzabschnitten mit angeschlossenen Porengasspeichern) zu gewährleisten, wurde in einem Feldtest (Versuchskampagne an einer Biogaseinspeiseanlage über einen Zeitraum von ca. 1.000 Stunden) gezeigt.

Im Rahmen des DVGW-Forschungsvorhabens G 201611 wurden Szenarien der zukünftigen Gasversorgung untersucht, in denen erhöhte Wasserstoffanteile im Erdgasnetz auftreten. Dabei lag der Fokus zum einen auf dem Schutz wasserstoffsensibler Anwendungen und zum anderen waren die Möglichkeiten der stofflichen Nutzung des Wasserstoffs durch Abtrennung vom Erdgas von Interesse. Als relevante Technologien zum Schutz von Anlagen wurden die Membrantechnik sowie die chemische Umwandlung des Wasserstoffs zu Methan (katalytische Methanisierung) bzw. zu Wasser (katalytische Oxidation) herausgearbeitet. Werden große Mengen Wasserstoff im Gasnetz transportiert, können bei gleichzeitigem LNG-Bedarf auch kryogene Trennverfahren zur H<sub>2</sub>-Separation eingesetzt werden. Anhand dreier Schutzszenarien sowie zweier Szenarien zur stofflichen H<sub>2</sub>-Nutzung wurden die entsprechenden Prozessketten entwickelt und energetisch wie auch wirtschaftlich bewertet. Vor allem im Falle von CNG-Tankstellen führt die H<sub>2</sub>-Behandlung aufgrund des geringen Gasdurchsatzes zu erheblichen Kostensteigerungen des Abgabepreises. Bei größeren Endanwendungen (z. B. der Glasherstellung oder dem Schutz von Gasturbinen im Gasnetz) fallen bis zu 20 % des Erdgaspreises zusätzlich an.

Neben den Arbeiten zur Entfernung von Spuren- und Begleitstoffen und Wasserstoff wurden die Arbeiten zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Brenn- oder Abgasströmen im Rahmen des Projekts „Biogasaufbereitung mit ionischen Flüssigkeiten“ (BGA-IL) fortgesetzt. Das Verfahren basiert auf der Anwendung einer chemischen Absorption von CO<sub>2</sub> in ionischen Flüssigkeiten (IL) und bietet auf Basis des vernachlässigbaren Dampfdrucks von IL den Vorteil, die Waschflüssigkeit statt durch Temperaturerhöhung mittels Druckabsenkung regenerieren zu können. Dadurch ist das Verfahren weniger komplex und es lassen sich deutliche energetische Einsparungen im Vergleich zu bisherigen Aufbereitungsverfahren darstellen. In 2018 wurde eine Realgasmesskampagne an einer Biogaseinspeiseanlage eines beteiligten Projektpartners durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass sich die verwendeten ionischen Flüssigkeiten dazu eignen, auch unter realitätsnahen Bedingungen CO<sub>2</sub> aus einer Biogasmatrix

abzuscheiden. Das Verfahren wurde vor Ort über einen Zeitraum von ca. sechs Wochen erfolgreich erprobt.

Zur Erweiterung des Anwendungsfeldes der IL-basierten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologie und zur Vertiefung von noch bestehenden wissenschaftlichen Fragestellungen ist es gelungen, ein europäisches Folgevorhaben zu initiieren. Das Projekt mit dem Titel: „Recycling carbon dioxide in the cement industry to produce added-value additives: a step towards a CO<sub>2</sub> circular economy“ (RECODE) zielt auf die Anwendung der Technologie zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus einem Zementwerk. Ziel ist die Behandlung von 50 m<sup>3</sup>/h Rauchgas bei einem gegenüber konventionellen Aminwäschen deutlich reduzierten Energiebedarf. Die Erreichbarkeit dieses Ziels wurde im vergangenen Jahr durch eine Gegenüberstellung verschiedener Technologien hinsichtlich ihres Energiebedarfs nachgewiesen. Im ersten Jahr der Projektbearbeitung stand außerdem die Identifikation geeigneter IL-Systeme für die oxidativen Bedingungen beim Einsatz der Waschsysteeme in Rauchgasen im Fokus. Hinsichtlich der Übertragung der IL-basierten Technologie zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung auf weitere Anwendungsfälle ist es in 2018 gelungen, ein weiteres Projekt zu initiieren: Im BMWi-geförderten Leitprojekt MethQuest wird die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung hinsichtlich des Einsatzes zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Umgebungsluft weiterentwickelt.

Einen weiteren Themenschwerpunkt der AG-VT stellt die katalytische Methanisierung zur Bereitstellung von SNG oder methanbasierten Kraftstoffen dar. Die Methanisierung kann dabei im Kontext der thermochemischen SNG-Erzeugung aus Biomasse oder der Power-to-Gas Prozesskette Anwendung finden. Neben der grundlegenden Verfahrensentwicklung in Kooperation mit den Arbeitsgruppen „Katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffumwandlung“ und „Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung“ standen in 2018 in der AG-VT verstärkt Fragestellungen rund um die in der Gruppe angesiedelte Demonstrationsanlage für die Wabemethanisierung („DemoSNG“ Anlage) im Vordergrund. Diese wurde in 2018 auf Anfrage des clean tech. Unternehmens Cortus Energy AB für den gekoppelten Betrieb mit einer Biomassevergasungsanlage ins schwedische Köping transportiert und vor Ort betrieben (**Bild 1.13**).

Erstmalig konnte so das im WoodRoll®-Vergaser produzierte Synthesegas zu Methan umgewandelt werden. Nach anschließender CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Trocknung wurde das firmeneigene CNG-Fahrzeug mit SNG aus Waldrestholz betrieben. Mittlerweile befindet sich die Methanisierungsanlage für weiterführende Untersuchungen im Rahmen des Energy Lab 2.0 Projektes wieder auf dem Gelände des KIT.

Nach drei Jahren erfolgreicher Zusammenarbeit von DVGW-EBI, EIFER und der Universität Stuttgart wurde

auch das Projekt „Innovative Erzeugung von CNG aus Rest- und Abfallstoffen“ (Res2CNG) abgeschlossen. Im entwickelten Verfahren werden Biomassevergasung, Hochtemperaturelektrolyse und Methanisierung thermisch integriert, wodurch ein Gesamtwirkungsgrad der Kraftstoffproduktion von 80 % erreicht und der biomassestämmige Kohlenstoff vollständig genutzt wird. Bei einem flexiblen Anlagenbetrieb werden Gestehungskosten im Bereich von Biomethan aus Fermentationsprozessen prognostiziert.

#### 1.4.3 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. Auch 2018 lag das Prüfaufkommen auf einer soliden Basis.

Neben der Prüftätigkeit wurde im Rahmen der betrieblichen Forschung des DVGW e.V. das Projekt G 201725 SiDi-meGe „Sicherheit von Dichtmitteln nach DIN EN 751 im eingebauten Zustand – grundlegende Untersuchungen“ bearbeitet. Es wurde die Anwendung von PTFE-Dichtbändern nach DIN EN 751-3 für die Klasse GRp untersucht. Der Forschungsbericht wird voraussichtlich im Frühjahr 2019 veröffentlicht. Die Ergebnisse werden auch bei der Fortschreibung der DIN EN 751-3 berücksichtigt werden.

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

- **DIN 30653** „Höher thermisch belastbare Dichtungen für Verschraubungen und Flansche in Verbindung mit Gaszählern und Druckregelgeräten“, Überführung aus DVGW VP 401 – neue Norm veröffentlicht 2018-08
- **DIN 3536** „Schmierstoffe für Gasarmaturen in der Hausinstallation, in Gasverteilungs- und Gastransportleitungen“ – neue Norm veröffentlicht 2018-09
- **DIN 3535-5** „Dichtungen für die Gasversorgung; Dichtungswerkstoffe aus Gummi, Kork und synthetischen Fasern für Gasarmaturen und Gasgeräte – Teil 5: Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung“ – Überarbeitung abgeschlossen, Veröffentlichung voraussichtlich im Frühjahr 2019
- **DIN 3535-6** „Dichtungen für die Gasversorgung – Teil 6: Flachdichtungswerkstoffe auf Basis von Fasern, Graphit oder Polytetrafluorethylen (PTFE) für Gasarmaturen, Gasgeräte und Gasleitungen“ – Überarbeitung abgeschlossen, Veröffentlichung voraussichtlich im Frühjahr 2019



**Bild 1.13:** Einsatz der Demonstrationsanlage zur Wabenmethanisierung in Kopplung mit der Biomassevergasung des schwedischen Partners Cortus Energy AB

- **DIN 30654** „Dichtungsprofile aus expandiertem PTFE für Flanschverbindungen der Gasversorgung“, Überführung aus DVGW VP 403 – Überarbeitung abgeschlossen, Veröffentlichung voraussichtlich im Frühjahr 2019
- **DIN EN 549** „Elastomer-Werkstoffe für Dichtungen und Membranen in Gasgeräten und Gasanlagen“ – Überarbeitung nach 1<sup>st</sup> formal vote, im Verfahren wurde ein 2<sup>nd</sup> formal vote erforderlich
- **DVGW G 481** „Anwendung von nichtmetallischem Dichtungsmaterial in der Gasversorgung und Gasverwendung“ überarbeitet – in Überarbeitung

Mit Abschluss der Fortschreibung DIN EN 549 wird sich CEN/TC 208 „Elastomeric seals for joints in pipework and pipelines“ WG4 „Seals and diaphragms for gas appliances and gas equipment“ der Fortschreibung DIN EN 751-3 annehmen. Die Arbeitsgruppe wird durch Herrn Strauß geleitet werden.

Herr Budde, der frühere Leiter Materialprüfung, hat sich nach langjähriger Tätigkeit als Experte in Normungsgremien und als Auditor für DVGW CERT GmbH, die er auch nach seiner Pensionierung fortführte, zurückgezogen. Wir danken Herrn Budde für sein Engagement und wünschen ihm alles Gute.

1.4.4 Arbeitsgruppe „Brennstofflabor“

Jochen Schütz

Durch diverse Neuanschaffungen wurde die Laborausstattung des Brennstofflabors weiterhin deutlich aufgestockt und Bestandsgeräte modernisiert bzw. erweitert. Unter anderem wurden bestehende Gaschromatographie-Systeme durch neue Geräte ersetzt. Je ein System zur Baumusterprüfung von Odoriermitteln und zur Bestimmung von höheren Kohlenwasserstoffen (z. B. in CNG) wurden angeschafft. Ein Dichtemessgerät für Flüssigkeiten bis 200 °C, ein Rheometer zur Viskositätsbestimmung bis 350 °C, ein Kontaktwinkelmessgerät und ein Titrator fanden ebenso den Einzug in die neuen Räumlichkeiten des Brennstofflabors.

Neben den etablierten Routineanalysen hat das Brennstofflabor im Geschäftsjahr 2018 vermehrt Messkampagnen an Biogasanlagen durchgeführt. Hierbei wurde nicht nur die Gasbeschaffenheit bei mehreren Prozessabschnitten bestimmt, sondern auch diverse Gasbegleitstoffe überwacht, um eine Tauglichkeit zur Einspeisung bzw. die Kraftstofftauglichkeit (CNG) zu gewährleisten. Weiterhin liegt der Fokus auch auf einer stärkeren Beteiligung an Forschungsprojekten.

1.5 Tagungen und Veranstaltungen

**Erfahrungsaustausch für Chemiker und Ingenieure des Gasfaches**

Mit freundlicher Unterstützung durch die Stadtwerke Karlsruhe GmbH und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) fand am 19.–21.09.2018 der 60. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches am Engler-Bunte-Institut in Karlsruhe statt. Die Jubiläumsveranstaltung war mit 85 Teilnehmern sehr gut besucht und es wurden in bewährter Form Fachbeiträge zu aktuellen gasfachlichen Themen aus Wissenschaft und Technik präsentiert (siehe **Tabelle 1.3**). Neben den Fachvorträgen wurde ein ansprechendes Rahmenprogramm angeboten. Am Vorabend versammelte man sich bei angenehmen Temperaturen zu einem Flammkuchenessen vor dem Neubau des Engler-Bunte-Instituts. Im Anschluss an das Vortragsprogramm des ersten Konferenztages wurde eine interessante Führung zum Stand der Bauarbeiten der Karlsruher U-Strab organisiert. Der informative Konferenztag wurde mit einer gelungenen Abendveranstaltung in der Höpfner Brauerei beendet.

**Gaskursus**

Auch 2018 fand der jährliche Gaskursus in Karlsruhe statt. In gewohnter Weise wurden die Teilnehmer durch das Grundwissen der Gastechnik bis hin zu den aktuellsten

**Tabelle 1.3:** Vortragsprogramm „Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches“ 2018 in Karlsruhe

Dr. Markus Ulmer (Stadtwerke Karlsruhe Netzservice GmbH)	Gasversorgung bei Stadtwerken heute und morgen – Beispiele aus Karlsruhe
Prof. Dr. Thomas Kolb (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))	Energieforschung am KIT – Strategie und aktuelle Projekte
Felix Ortloff (DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut)	Bewertung von Quellen und Abtrennungsverfahren zur Bereitstellung von CO <sub>2</sub> für PtG Prozesse
Dr. Helge Föcker (Uniper Energy Storage GmbH)	Demonstration der Wabenmethanisierung am Standort Falkenhagen im Rahmen des EU-Vorhabens STORE&GO
Prof. Dr. Dimosthenis Trimis (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))	Pilotbetrieb eines hocheffizienten PtG-Prozesses – Ergebnisse des EU-Vorhabens Helmeth
Gert Müller-Syring (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH)	Strategieroadmap Power-to-Gas – Szenarien für die Etablierung von EE-Gasen aus Sicht der Gasinfrastruktur
Dr. Petra Nitzschke-Kowsky, Werner Weißing (E.ON Metering GmbH)	Grenzen der Zumischung von Wasserstoff ins Erdgas aufgrund möglicher Änderungen von Gasbeschaffenheitskennwerten sowie aus der Gasbrennertechnik
Dr. Rolf Albus (Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.)	Erkenntnisse aus vier Jahren L/H-Gasumstellung
Frank Rathlev (Thyssengas GmbH)	Innovationen in der Leitungsbefliegung
Dr. Achim Zajc (Meter-Q Solutions GmbH)	Methoden zur schnellen Brennwertmesstechnik – Ein Vergleich und Ergebnisse aus dem Feld

Fragestellungen und Innovationsthemen der Gaswirtschaft geführt.

## Veröffentlichungen EBI ceb 2018

- Bär, K.; Merkle, W.; Tuczinski, M.; Saravia, F.; Horn, H.; Ortloff, F. et al. (2018): Development of an innovative two-stage fermentation process for high-calorific biogas at elevated pressure. In: Biomass and Bioenergy 115, S. 186–194. DOI 10.1016/j.biombioe.2018.04.009
- Blanco, H.; Nijs, W.; Ruf, J.; Faaij, A. (2018): Potential of Power-to-Methane in the EU energy transition to a low carbon system using cost optimization. In: Applied Energy 232, S. 323–340. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.08.027
- Cavagnol, S.M.; Covella, K.; Zimmerlin, B.; Kolb, T.; Müller-Hagedorn, M. (2018): Analysis of slag thickness and critical temperature in entrained flow gasification of biomass at the bioliq® plant. 9<sup>th</sup> International Freiberg Conference on IGCC & Xtl Technologies, Closing the Carbon Cycle. Berlin, 03.06.2018
- Chaussonnet, G.; Koch, R.; Bauer, H.-J.; Sängler, A.; Jakobs, T.; Kolb, T. (2018): Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation of an Air-Assisted Atomizer Operating at High Pressure. Influence of Non-Newtonian Effects. In: J. Fluids Eng. 140 (6), S. 61301. DOI: 10.1115/1.4038753
- Covella, K.; Cavagnol, S.M.; Müller-Hagedorn, M.; Zimmerlin, B.; Kolb, T. (2018): Data Validation and Reconciliation of Entrained-Flow Gasification with Aspen Plus. 9<sup>th</sup> International Freiberg Conference on IGCC & Xtl Technologies, Closing the Carbon Cycle. Berlin, 03.-08-06.2018
- Dahmen, N. (2018): Entwicklungsstand und Perspektiven des bioliq®-Prozesses. 15. Internationaler Fachkongress für erneuerbare Mobilität. Bundesverband BioEnergie e. V. Berlin, 22.01.2018. Online verfügbar unter <http://www.kraftstoffe-der-zukunft.com>
- Eberhard, M.; Santo, U.; Böning, D.; Schmid, H.; Michelfelder, B.; Zimmerlin, B. et al. (2018): Der bioliq®-Flugstromvergaser - ein Baustein der Energiewende. In: Chemie Ingenieur Technik 90 (1-2), S. 85–98. DOI: 10.1002/cite.201700086
- Eberhard, M.; Santo, U.; Schmid, H.; Michelfelder, B.; Günther, A.; Weigand, P.; Stapf, D.; Kolb, T. (2018): The bioliq® Entrained-Flow Gasifier – optimizing the central process unit in a sustainable biomass-to-liquid process. 9<sup>th</sup> International Freiberg Conference on IGCC & Xtl Technologies, Closing the Carbon Cycle. Berlin, 03.06.2018.
- Eckel, G.; Le Clercq, P.; Kathrotia, T.; Saenger, A.; Fleck, S.; Mancini, M. et al. (2018): Entrained flow gasification. Part 3. Insight into the injector near-field by Large Eddy Simulation with detailed chemistry. In: Fuel 223, S. 164–178, DOI: 10.1016/j.fuel.2018.02.176
- Fleck, S.; Santo, U.; Hotz, C.; Jakobs, T.; Eckel, G.; Mancini, M. et al. (2018): Entrained flow gasification Part 1. Gasification of glycol in an atmospheric-pressure experimental rig. In: Fuel 217, S. 306–319. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.12.077.
- Gegenheimer, J.; Schreiter, N.; Worch, D.; Trouillet, V.; Kureti, S.; Lubenau, U.; Ortloff, F.; Kolb, T. (2018): Entfernung von Sauerstoff aus Biogas via Methanoxidation. Einsatz neuartiger Katalysatoren. In: gwf - Gas+Energie 159 (10), S. 116–125.
- Graf, F. (2018): Green methane: speeding up a cost-efficient energy transition. European Energy Innovation - Communications.
- Graf, F. (2018): Innovating power-to-gas technology. In: impact (1), S. 81–83.
- Graf, F. (2018): STOREandGO, Innovative large-scale energy STORagE technologies AND Power-to-Gas concepts after Optimisation, H2020. In: impact 2018 (1), S. 81–83. DOI: 10.21820/23987073.2018.81.
- Graf, F. et al. (2018): Gas. In: BWK Band 70 (5), S. 82–101.
- Gruber, M.; Wieland, C.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Schollenberger, D.; Bajohr, S. et al. (2018): Modeling and Design of a Catalytic Wall Reactor for the Methanation of Carbon Dioxide. In: Chemie Ingenieur Technik 90 (5), S. 615–624, DOI: 10.1002/cite.201700160
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J. (2018): Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser im Jahre 2017. In: gwf - Wasser und Abwasser 159 (6), S. 47–65.
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J. (2018): Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahre 2017, Teil 1. In: gwf - Gas+Energie 159 (6), S. 49–67.
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J. (2018): Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahre 2017, Teil 2. In: gwf - Gas+Energie 159 (7–8), S. 64–79.
- Hüsing, F.; Kolb, T. (2018): Hochtemperaturtechnik - Entwicklungen auf der ACHEMA 2018. In: Chemie Ingenieur Technik 90 (12), S. 1972–1973.
- Kolb, T.; Sängler, A.; Jakobs, T.; Müller, T.; Kadel, K.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Zarzalis, N. (2018): ASME (Hrsg.) Simulation of the Primary Jet Breakup of Non-Newtonian Fuels: Basic Research for Simulation-Assisted Design of Low-Grade Fuel Burner; ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT 2018. Oslo, Norwegen, 11.-15.06.
- Kolb, T. (2018): Chemische Energieträger / Sektorkopplung - ein Beitrag des Engler-Bunte-Instituts zur Energiewende. Fraunhofer ISE, Freiburg/Brsg. Freiburg, 20.03.2018.
- König, S.; Bchini, Q.; McKenna, R.; Köppel, W.; Bachseitz, M.; Entress, J. et al. (2018): Analysing the regional potential and social acceptance of power-to-gas in the context of decentralized co-generation in Baden-Württemberg. In: Journal of Energy Storage 16, S. 93–107. DOI: 10.1016/j.est.2017.12.011.
- Lefebvre, J. (2018): Synchrotron based operando characterization of Ni- and Co-based P2X catalysts. 9<sup>th</sup> Int. Freiberg Conference on IGCC & Xtl Technologies. Freiberg, 03.06.2018.
- Lefebvre, J.; Schollenberger, D.; Bajohr, S.; Graf, F.; Kolb, T. (2018): Power-to-Gas PtG - Ein Element der Energiewende. Poster. KIT im Rathaus, 31.01.2018
- Lefebvre, J.; Trudel, N.; Bajohr, S.; Kolb, T. (2018): A study on three-phase CO<sub>2</sub> methanation reaction kinetics in a continuous stirred-tank slurry reactor. In: Fuel 217, S. 151–159, DOI: 10.1016/j.fuel.2017.12.082
- Loipersböck, J.; Luisser, M.; Müller, S.; Hofbauer, H.; Rauch, R. (2018): Experimental Demonstration and Validation of Hydrogen Production Based on Gasification of Lignocellulosic Feedstock. In: Chem-Engineering 2 (4), S. 61. DOI: 10.3390/chemengineering2040061
- Mancini, M.; Alberti, M.; Dammann, M.; Santo, U.; Eckel, G.; Kolb, T.; Weber, R. (2018): Entrained flow gasification. Part 2. Mathematical modeling of the gasifier using RANS method. In: Fuel 225, S. 596–611. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.03.100
- McKenna, R.; Bchini, Q.; Weinand, J. M.; Michaelis, J.; König, S.; Köppel, W.; Fichtner, W. (2018): The future role of Power-to-Gas in the energy transition: Regional and local techno-economic analyses in Baden-Württemberg. In: Applied Energy 212, S. 386–400. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.017.
- Missal, P.; Hirschel, S.; Kolb, T.; Leibfried, T.; Hohmann, S.; Walter, J.; Schnack, D. (2018): Regionalized power supply at distribution grid level. In: gas for energy, 2018, S. 32
- Mörs, F. (2018): Hydrodynamik in Blasensäulen bei erhöhtem Druck - Messung von relativem Gasgehalt und Blasengröße. Dechema Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen MPH & WSUE & CFD, HTT & AuW, KRI, PMT. Dechema. Bremen, 06.03.2018

- Ortloff, F.; Roschitz, M.; Ahrens, M.; Graf, F.; Schubert, T.; Kolb, T. (2018): Characterization of functionalized ionic liquids for a new quasi-isothermal chemical biogas upgrading process. In: Separation and Purification Technology 195, S. 413–430. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.12.014
- Rauch, R. (2018): Influence of Olivine Activity on Plant Performance of a Commercial Dual Fluidized Bed Gasifier Power Plant in Thailand. 2<sup>nd</sup> International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). Singapore, 24.03.2018 - 26.03.2018
- Rauch, R. (2018): Mathematical Model of Fischer Tropsch Synthesis Employing Carbon-Number Dependent Kinetics. 6<sup>th</sup> International Conference on Chemical Technology. Mikulov, Czech Republic, 16.04.2018
- Rauch, R. (2018): Valorization of char from biomass gasification as catalyst support: Preliminary results of Fischer-Tropsch tests. 26<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition. Kopenhagen, Dänemark, 14.05.2018
- Rauch, R. (2018): Hydrogen production by biomass steam gasification. 13<sup>th</sup> Hydrogen Power Theoretical & Engineering Solutions International Symposium. Singapore, 24.07.2018
- Sänger, A.; Jakobs, T.; Kolb, T.; Müller, T.; Kadel, K.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Zarzalis, N. (2018): ASME (Hrsg.) Influence of Reactor Pressure on the Primary Jet Breakup of High-Viscosity Fuels: Basic Research for Simulation-Assisted Design of Low-Grade Fuel Burner; ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT 2018. Oslo, Norwegen, 11.-15.06
- Schneider, C. (2018): Reaction Kinetics and Reactive Surface Area during Gasification of High-Temperature Biomass Char with CO<sub>2</sub>. 2<sup>nd</sup> International Workshop on Oxy-Fuel Combustion. Bochum, 14.-15.02.18
- Schollenberger, D.; Bajohr, S.; Gruber, M.; Reimert, R.; Kolb, T. (2018): Scale-Up of Innovative Honeycomb Reactors for Power-to-Gas Applications – The Project Store&Go. In: Chemie Ingenieur Technik 90 (5), S. 696–702. DOI: 10.1002/cite.201700139
- Schollenberger, D.; Bajohr, S.; Reimert, R.; Kolb, T. (2018): Einsatz von Wabenreaktoren zur Methanisierung bei Power-to-Gas-Prozessen. In: gwf - Gas+Energie 159 (10), S. 108–115
- Schulz, H. (2018): About the Mechanism of Methanol Conversion on Zeolites. In: Catal Lett 148 (5), S. 1263–1280. DOI: 10.1007/s10562-018-2342-3
- Seyednejadian, S.; Rauch, R.; Bensaid, S.; Hofbauer, H.; Weber, G.; Saracco, G. (2018): Power to Fuels. Dynamic Modeling of a Slurry Bubble Column Reactor in Lab-Scale for Fischer Tropsch Synthesis under Variable Load of Synthesis Gas. In: Applied Sciences 8 (4), S. 514. DOI: 10.3390/app8040514
- Stoesser, P.; Schneider, C.; Kreitzberg, T.; Kneer, R.; Kolb, T. (2018): On the influence of different experimental systems on measured heterogeneous gasification kinetics. In: Applied Energy 211, S. 582–589. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.037
- Strehle, F.; Pfeifer, M.; Kölsch, L.; Degünther, C.; Ruf, J.; Andresen, L.; Hohmann, S. (2018): Towards Port-Hamiltonian Modeling of Multi-Carrier Energy Systems. A Case Study for a Coupled Electricity and Gas Distribution System. In: IFAC-PapersOnLine 51 (2), S. 463–468. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.03.078
- Trudel, N.; Mörs, F. et al. (2018). Ressourceneffiziente Methanolsynthese im Blasensäulenreaktor. ProcessNet Jahrestagung Biotechnologie. Aachen, 10.-13.09
- Trudel, N.; Mörs, F.; Hlawitschka, M. W.; Wirz, D.; Lichti, M.; Bajohr, S. et al. (2018): Ressourceneffiziente Methanolsynthese im Blasensäulenreaktor. In: Chemie Ingenieur Technik 90 (9), S. 1143–1144. DOI: 10.1002/cite.201855025
- Ullrich, T.; Lindner, J.; Bär, K.; Mörs, F.; Graf, F.; Lemmer, A. (2018): Influence of operating pressure on the biological hydrogen methanation in trickle-bed reactors. In: Bioresource Technology 247 (1), S. 7–13. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.069

## 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 Forschung und Lehre

Im Teilinstitut für Verbrennungstechnik wurden auch 2018 neue Forschungsgebiete mit dem Schwerpunkt flexible Energiebereitstellung bearbeitet und bereits etablierte Forschungsbereiche thematisch weiterentwickelt. Im Rahmen der Forschungsgebiete Energiespeicherung und -umwandlung, Rußbildung, Geräuscentwicklung und den damit verbundenen Verbrennungsinstabilitäten sowie der Verbrennungstechnik in stationären und Flugzeuggasturbinen wurde eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, an denen auch der ehemalige Leiter Prof. Bockhorn weiterhin in angemessenem Umfang beteiligt ist.

Die Ausrichtung der Forschungsarbeiten des Teilinstituts hat folgenden Hintergrund:

- Als eine zentrale Zielstellung der kommenden Jahrzehnte wird die Sicherstellung der Energieversorgung auch weiterhin in vielen Feldern der Forschung und Entwicklung präsent sein. Themen rund um erneuerbare Energien, alternative Kraftstoffe, Energiespeiche-

rung und Energieeffizienz spielen dabei ebenso eine entscheidende Rolle wie deren aufgrund ihrer schwankenden Verfügbarkeit schwierige Bereitstellung und Verteilung, wobei dies durch schnelle und präzise Steuerung und eine intelligente Vernetzung zu ermöglichen ist.

- Alternative und erneuerbare Energiequellen werden in Zukunft verstärkt auch in die Prozesse der Fertigungsindustrie integriert werden, so dass die spezifischen Auswirkungen ihrer schwankenden Verfügbarkeit und der daraus resultierenden Konsequenzen bei ihrer Anwendung Auswirkungen auf die Sicherstellung der Produktqualität haben werden und somit ebenfalls ein wichtiges Thema sein werden. Im Zusammenhang mit diesen Grundüberlegungen steigen die Anforderungen, die an die Qualität der Produkte, die Energieeffizienz ihrer Bereitstellung und damit auch an die exakte Steuerbarkeit aller Prozesse gestellt werden müssen.

- Um eine kontinuierliche Energieversorgung zu gewährleisten, wird 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 der Expertise mehrerer Disziplinen entwickelt werden. Als Konsequenz daraus wird die interdisziplinäre Verbundforschung, insbesondere mit den Materialwissenschaften, an Bedeutung gewinnen.
- Sowohl experimentelle als auch numerische Methoden sind im Hinblick auf die zu erwartenden Probleme wichtig. Die Erhöhung der Rechenleistung ermöglicht eine genauere Modellierung und numerische Simulation von immer komplexeren und mehrskaligen Prozessen.

Entsprechend verfolgt das Teilinstitut für Verbrennungstechnik mittel- und langfristig folgende Forschungsschwerpunkte:

- Durch die zu erwartende Veränderung der Zusammensetzung zukünftig eingesetzter Kraft- und Brennstoffe, die sich in Richtung wasserstoffreicher sowie synthetischer und biogener Komponenten und Schwachgase verschieben wird, ist die genaue Bestimmung der Verbrennungseigenschaften immer wichtiger. Forschungsthemen, welche die Charakterisierung von wasserstoffhaltigen, biogenen und synthetischen Kraftstoffen und Gemischen, sowohl gasförmig als auch flüssig, in den Fokus nehmen, werden zunehmend an Bedeutung gewinnen. Untersuchungen zu Zündvorgängen, Strömungs- und Verbrennungsinstabilitäten, Spraybildung und Verbrennung der neuartigen flüssigen Brennstoffe, Wechselwirkungen zwischen Verbrennungsprozessen und Werkstoffen sowie auch grundlegende Untersuchungen der Flammenstruktur an Modellflammen sind für deren Einsatz 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 werden überwiegend Veranstaltungen in den klassischen Bereichen der Verbrennungstechnik aber auch weitergehende Lehrveranstaltungen in Grund- und Vertiefungsfächern der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik (CIW/VT) angeboten. Das Praktikum „Numerik im Ingenieurwesen“ sowie die Vorlesungen „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien“, „Messtechnik in der Ther-

mofluidodynamik“ und „Energietechnik“ können hier erwähnt werden.

Neben diesen besonders hervorgehobenen Veranstaltungen sind mehrere Studierende während ihres Studiums an den Forschungsaktivitäten des Teilinstituts beteiligt. Im Jahr 2018 wurden 13 Bachelor- und Masterarbeiten abgeschlossen.

## 2.2 Preise und Auszeichnungen

Im Jahr 2018 erhielten Angehörige des Teilinstituts folgenden Preise und Auszeichnungen:

- Das *Combustion Institute* (CI) hat in 2018 die erste Klasse von *Fellows of the Combustion Institute* bekannt gegeben. In diesem Rahmen wurde Herr Prof. Bockhorn als „*Fellow of the Combustion Institute*“ für seine innovativen Forschungsarbeiten zu Verbrennung, Pyrolyse und verschiedenen thermischen Prozessen nominiert. Als engagierte Mitglieder der internationalen Verbrennungsgemeinschaft wurden bei diesem Anlass die 125 gewählten *Fellows* von ihren Kollegen für herausragende Beiträge zur Verbrennung ausgezeichnet, sei es in der Forschung oder in der Anwendung.
- Herr *Thorsten Zirwes* (*Steinbuch Centre for Computing* des KIT unter der wiss. Betreuung des Teilinstituts für Verbrennungstechnik am EBI) erhielt 2018 beim *Joint Meeting* der deutschen und italienischen Sektion des *Combustion Instituts* einen Preis für den besten Vortrag.
- Der gemeinsame Beitrag der Teilinstitute Verbrennungstechnik und Chemische Energieträger, Brennstofftechnologie „Influence of Nozzle Design Upon the Primary JetBreakup of High-Viscosity Fuels for Entrained Flow Gasification“ von Müller et al., der 2017 auf der *ASME Turbo Expo* in Seoul präsentiert wurde, wurde auf der *ASME Turbo Expo 2018* in Oslo vom Gremium der Sektion *Coal, Biomass & Alternative Fuels* mit dem Best Paper Award ausgezeichnet.
- Herr *Linus Biffar* erhielt den DVGW-Studienpreis Gas für seine Masterarbeit „Modellierung eines Wabenreaktors zur Methanisierung von CO<sub>2</sub>“, in welcher er verschiedene Modelle für das Einsatzgebiet des Reaktortyps Wabenreaktor und dessen Verhalten bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen untersucht hat.
- Herr *Thorsten Zirwes* erhielt auf der 6. OpenFOAM Konferenz 2018 in Hamburg den *Student Paper Award* für die Publikation „Optimizing Load Balancing of Reacting Flow Solvers in OpenFOAM for High Performance Computing“.

## 2.3 Laufende Forschungsarbeiten im Bereich Verbrennungstechnik

Die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Verbrennungstechnik konzentriert sich auf Problemstellungen,

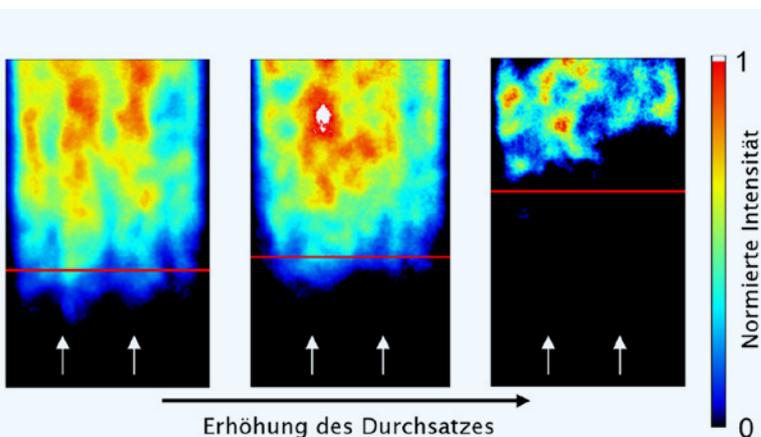
die sich für die Speicherung und Bereitstellung von Energie aus fossilen und nachwachsenden Rohstoffen ergeben, auf eine Reduktion der Entstehung von Schadstoffen bei der Verbrennung fossiler und zunehmend auch nicht-fossiler, nachwachsender Brennstoffe, auf die Entwicklung von neuen Verbrennungskonzepten 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 wird 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.

Eine ähnliche Zielstellung verfolgt auch das von der Europäischen Union im Rahmen des „Horizon 2020“ Programms geförderte Verbundprojekt „Turbomachinery retrofits enabling flexible back-up capacity for the transition of the European energy system“ (TurboReflex): Für eine Überbrückung der Zeitspanne zwischen angeforderter Leistung und einer Bereitstellung durch erneuerbare

Energiequellen ist die installierte Leistung fossil befeuerter Kraftwerke zwar groß genug, aber die vorhandenen Anlagen sind in erster Linie nur für die Abdeckung der Grundlast ausgelegt. Eine von dieser Leistungsabnahmeform abweichende Betriebsweise führt zu erhöhtem Verschleiß sowie unnötig hohen Emissionen. Im Verbundprojekt TurboReflex wird daher die Bereitstellung von Technologien zur Aufrüstung bereits installierter Kraftwerke auf eine flexiblere Betriebsweise vorangetrieben, um so zu erreichen, dass eine solche Betriebsweise 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 magere Verlöschgrenze („lean blow off“, LBO) dar. Strahlstabilisierte, vorgemischte Flammen können in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit sein, Verbrennungstemperaturen von nur 1000-1200 °C zu erreichen und so eine Erweiterung des möglichen Teillastbetriebs bis zu 20-25 % bei gleichen Emissionen zu erreichen. Am Teilinstitut für Verbrennungstechnik wird in diesem Rahmen die numerische Vorhersagbarkeit der Verlöschgrenzen mit fortschrittlichen Verbrennungsmodellen untersucht und verbessert. In der ersten Phase des im Projekt bearbeiteten Arbeitspakets wurden Messdaten zur Validierung der Rechnungen generiert (**Bild 2.1**) sowie das isotherme Strömungsfeld einer Matrix von Strahlen detailliert untersucht.

Ein wichtiges Element für die nachhaltige Umstellung des Energiesystems ist die effiziente Speicherung von Energie – insbesondere von der unregelmäßig anfallenden Sonnen- und Windenergie. Das Teilinstitut Verbrennungstechnik und weitere Partner sind bei der Bearbeitung dieses Problemfeldes am Projekt „STORE&GO“ des EU-Forschungs- und Innovationsprogramms „Horizon 2020“ beteiligt, das von dem Bereich Gastheorie der DVGW-Forschungsstelle am Teilinstitut Chemische Energieträger, Brennstofftechnologie (EBI ceb) koordiniert wird. Ausführliche Informationen sind dem Abschnitt, der dem Teilinstitut EBI ceb zugeordnet ist, zu entnehmen. Das Teilinstitut Verbrennungstechnik unterstützt die Koordination des Projekts und führt numerische Simulationen zur Auslegung der Methanisierungsreaktoren durch. In Zusammenhang mit einem ähnlichen Problemfeld wird im Rahmen des EU-finanzierten Projektes CELBICON (*Cost-effective CO<sub>2</sub> conversion into chemicals via combination of capture, electro-chemical and biochemical conversion technologies*) auch eine Technologie zur Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Chemikalien entwickelt, die durch hohe Effizienz im kleinen Maßstab auch zum Einsatz in Kombination mit den dezentral vorkommenden erneuerbaren Energien geeignet ist. Der CELBICON Prozess beinhaltet die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und deren Umwandlung in Synthesegas in einem elektro-katalytischen



**Bild 2.1:** Abheben von Strahlflammen über der Düsenmatrix erfasst mit OH\*-Chemilumineszenz

Reaktor mit anschließender biotechnologischer Umwandlung und Weiterverarbeitung in verschiedene Endprodukte (z. B. Isopren oder Biokunststoffe). Die Forschungsaufgabe des Teilinstituts für Verbrennungstechnik im CELBICON Projekt ist es, eine energieeffiziente Bereitstellung des Einsatzmaterials der  $\text{CO}_2$ /Wasser-Lösung unter erhöhtem Druck für die Elektro-katalytische Einheit zu erarbeiten. Da der Energieverbrauch der Lösung von  $\text{CO}_2$  in einer Flüssigkeit vom Energieaufwand für die Kompression des gasförmigen  $\text{CO}_2$  dominiert wird, wird auf der Grundlage von aktuellen Entwicklungen eine neue Methode zur Kompression und gleichzeitigen Lösung von  $\text{CO}_2$  in Flüssigkeiten erforscht. In dem ebenfalls EU-finanzierten Projekt RECODE (*Recycling carbon dioxide in the cement industry to produce added-value additives: a step towards a  $\text{CO}_2$  circular economy*) wird ein ähnlicher Ansatz zur Energieeinsparung und zur Reduktion von Treibhausgasemissionen verfolgt: der  $\text{CO}_2$ -Gehalt aus dem Rauchgas einer Zementfabrik soll in elektrolytischen Flüssigkeiten (z. B. Tetrabutylammoniumbromid) gelöst werden, um anschließend in weiteren Prozessschritten Zusatzstoffe für die Zementproduktion herzustellen. Das dabei erzeugte  $\text{CO}_2$  wird zu einem wesentlichen Teil innerhalb der Anlage selbst genutzt, wodurch ein  $\text{CO}_2$ -Kreislauf entsteht und die Umweltauswirkungen der Anlage reduziert werden.

Gegenstand des Leitprojekts MethQuest sind technische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Unterstützung der Einführung und des Markthochlaufs von methanbasierten Kraftstoffen, die mithilfe erneuerbarer Energiequellen (EE) ohne fossilen Kohlenstoff hergestellt werden. Dieses EE-Methan soll in komprimierter oder verflüssigter Form im PKW-, LKW- und Schiffsverkehr und in flexiblen stationären Verstromungseinheiten zum Einsatz kommen. MethQuest verbindet die sechs vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundvorhaben MethFuel, MethCar, MethPower, MethMare, MethGrid und MethSys und wird von dem Bereich Gastheorie der DVGW-Forschungsstelle in Zusammenarbeit mit MTU GmbH koordiniert. Ausführliche Informationen dazu sind im Abschnitt, der dem Teilinstitut Chemische Energieträger, Brennstofftechnologie zugeordnet ist, zu finden. Im Rahmen des in 2018 gestarteten Verbundvorhabens MethCar wird in diesem Zusammenhang ein optimiertes EE-G-Methan-Motorkonzept entwickelt, das hinsichtlich Effizienz und Emissionsverhalten deutliche Vorteile gegenüber dem Stand der Technik aufweist. Zudem werden Kraftstoffeigenschaften formuliert, die erforderlich sind, um die dargestellten Effizienz- und Emissionsvorteile im Realbetrieb umsetzen zu können. Ziel des Teilinstituts Verbrennungstechnik in MethCar ist es, durch grundlegende Flammenuntersuchungen Grenzbedingungen zu bestimmen, unter denen sich

Schadstoffe und Feinpartikel aus der Motorverbrennung von EE-G-Methan bilden könnten.

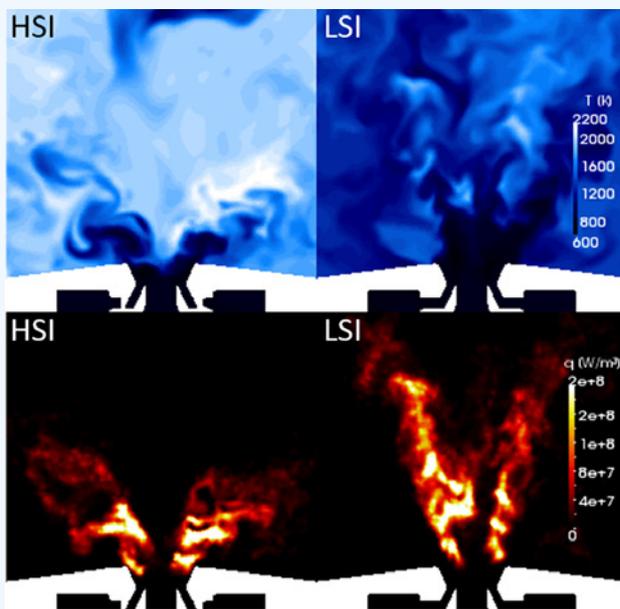
Im Gegensatz zu klassischen, kohlenwasserstoffbasierten Energiespeichermedien wird in dem von der Europäischen Union geförderten Projekt „Renewable Power Generation by Solar Particle Receiver Driven Sulphur Storage Cycle“ (PEGASUS) Energie, die mit einem Solarturmkraftwerk gewonnen wird, mit einem thermochemischen Speichersystem auf Grundlage von elementarem Schwefel und Schwefelsäure gespeichert. Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung und Demonstration des Solarturmkraftwerks, das in einem geschlossenen Stoffkreislauf Sonnenenergie über Nacht (oder längerfristig) speichert und so erneuerbare Energien grundlastfähig macht und eine verlässliche Stromerzeugung bei signifikanter Kostenreduktion im Vergleich zu aktuellen Konzepten ermöglicht. In dem vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) koordinierten Projekt ist das Teilinstitut Verbrennungstechnik für die Entwicklung und Tests der Brenner für elementaren Schwefel mit hoher Energiedichte verantwortlich. Im Labormaßstab werden Brenner mit einer Leistung von bis zu 50 kW untersucht. Die Verbrennung von elementarem Schwefel mit den geforderten hohen Energiedichten stellt große Anforderungen an Design und Optimierung des Brenners, so dass dafür auch grundlegende Untersuchungen zur chemischen Kinetik der Schwefeloxidation durchgeführt werden müssen. Erste numerische Simulationen sind in der Lage, erwartete charakteristische Verhaltensweisen in Bezug auf dominante turbulente Strömungsmuster, Tropfenverdampfung, Mischung, Zündung und Flammenstabilisierung so zu reproduzieren, wie sie bereits in früheren experimentellen Arbeiten mit einem ähnlichen Düsendesign und anderen Brennstoffen manifestiert wurden. Die Simulationen liefern zusätzlich einen detaillierten Einblick in die zugrundeliegenden Strömungs-, Spray- und Reaktionssysteme, indem sie die Strömungsvariablen innerhalb des gewählten Rechengebietes auflösen. Die erzielten vielversprechenden Ergebnisse zeigen den Nutzen der Simulationen für die computergestützte Auslegung neuartiger Brennersysteme (**Bild 2.2**).

Um die Beschichtung von Stahlbändern hinsichtlich Platz- und Energiebedarf effizienter zu gestalten, wird im Rahmen des europäischen Verbundprojektes „Energy Efficient Coil Coating Process“ (ECCO), das vom Teilinstitut Verbrennungstechnik koordiniert wird, ein neues Ofenkonzept entwickelt. Dieses basiert auf der Trocknung der mit lösemittelhaltigen Beschichtungen versehenen Bänder unter lösemittelhaltiger, sauerstoffreduzierter Atmosphäre. Dieses Konzept erfordert die Trennung von Trocknungs- und Brennerbereich durch infrarot (IR) transmissive Scheiben. Im Brennerbereich befinden sich Strahlungsbrenner aus porösen, inerten Medien, die Inf-

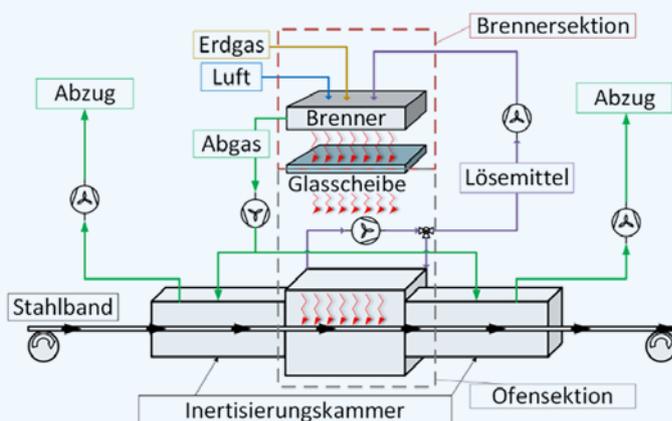
rarotstrahlung zur Trocknung durch Festkörperstrahlung bereitstellen. Diese Brenner werden im Rahmen des Projektes am Teilinstitut Verbrennungstechnik hinsichtlich ihrer Strahlungsauskopplung optimiert. Als Brennstoff dient dabei neben Erdgas auch die aus der Trocknungskammer extrahierte lösemittelhaltige Atmosphäre. Unter anderem hat die Tatsache, dass die thermische Verwertung der Lösemittel direkt in den Brennern erfolgt und somit keine Nachverbrennung erforderlich ist, eine enorme Steigerung der Energieeffizienz und eine Verringe-

rung der Anlagengröße zur Folge. Ein im Rahmen des Projektes entwickeltes Inertisierungskonzept basierend auf einem Vor- und Nachkammerprinzip verhindert den Eintrag von Luft in die Trocknungskammer und ermöglicht somit einen sicheren Betrieb der Gesamtanlage. Dafür müssen neben verbrennungstechnischen Eigenschaften die Explosionsgrenzen und Sauerstoffgrenzkonzentrationen der Lösemittel experimentell ermittelt werden, da aufgrund der Komplexität der Mischungen, die durch die hohe Anzahl der vorhandenen Gemischkomponenten entsteht, keine Literaturdaten für kommerzielle Lösemittelrezepturen vorhanden sind. Am Teilinstitut Verbrennungstechnik wurden weiterhin laminare Flammgeschwindigkeiten der Lösemittelrezepturen für unterschiedliche Luftzahlen bei einer Vorwärmtemperatur von 160 °C an einem Flachflammenbrenner nach der „Heat Flux Method“ gemessen. Bei der Untersuchung fetter Gemische sind dabei zelluläre Strukturen der Flammenoberfläche zu beobachten, welche die Bestimmung der Flammgeschwindigkeit erschweren (Bild 2.3 rechts). Für magere Gemische wurde eine optisch flache Flamme beobachtet und daher die laminare Flammgeschwindigkeit akkurat bestimmt. Mit Hilfe eines Bombenkalorimeters konnten zudem Heizwerte sowie in einem geschlossenen, druckfesten Behälter Explosionsgrenzen und Sauerstoffgrenzkonzentrationen der Lösemittel bestimmt werden.

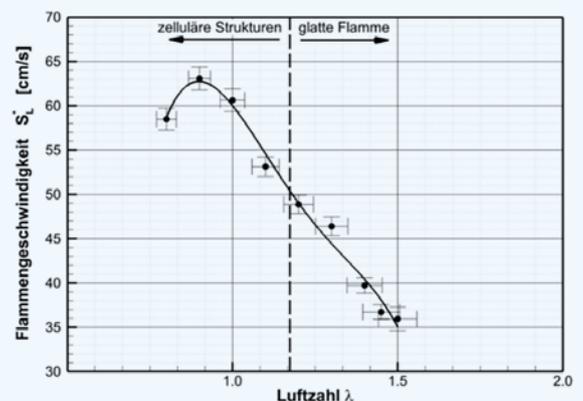
Im ebenfalls europäisch geförderte Verbundprojekt „Advanced direct biogas fuel processor for robust and cost-effective decentralised hydrogen production“ (BioRoburPlus) steht die Erschließung neuer, nachhaltiger Routen zur Bereitstellung von Energie im Fokus. Dabei wird Wasserstoff aus regenerativem Biogas mittels oxidativer Dampfreformierung produziert. Ziel des Projektes ist die De-



**Bild 2.2:** Berechnetes Flammenbild bei Variation der aufgeprägten Drallintensität (LES Simulation mit Beschreibung des Sprays nach der Euler-Lagrange Methode; HSI: hohe Drallzahl – LSI kleine Drallzahl)



**Bild 2.3:** Konzept zur Trocknung des mit einer lösemittelhaltigen Beschichtung versehenen Stahlbandes und mit der Heat-Flux-Methode gemessene Flammgeschwindigkeiten von Lösemittelrezepturen bei hoher Vorwärmtemperatur (160 °C)

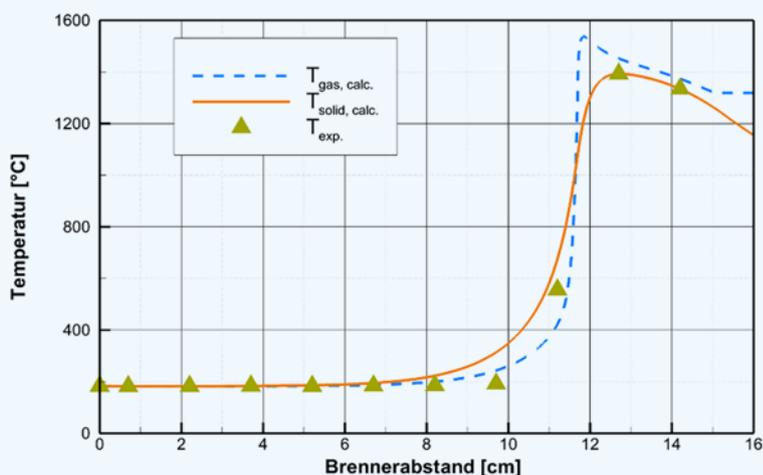


monstration des Prozesses mit hohem Wirkungsgrad im technisch relevanten Maßstab von ca. 100 kg H<sub>2</sub> pro Tag. Bei der Aufreinigung des Endprodukts H<sub>2</sub> fällt ein niederkalorisches Gasgemisch mit hohem Inertanteil von 70 %-vol. CO<sub>2</sub> und 20 %-vol. H<sub>2</sub> (sog. Schwachgas) an. Die energetische Verwertung dieses Schwachgases im Prozess ist die Grundlage für einen hohen Wirkungsgrad und damit für wettbewerbsfähige Produktionskosten. Beitrag des Teilinstituts Verbrennungstechnik zum Projekt ist ein Brennersystem für Schwachgase inklusive der Wärmeübertrager, die für die Einkopplung der freigesetzten Wärme benötigt werden. Der entwickelte Porenbrenner deckt dabei nicht nur ein weites Leistungsspektrum von 4-34 kW ab, sondern kann neben dem Schwachgas auch mit Biogas mit einem Methananteil von 60 % betrieben werden. Das System ermöglicht die vorgemischte Verbrennung mit Vorwärmtemperaturen von bis zu 550 °C und fungiert im Gesamtprozess als Überhitzer sowie zur Dampfbereitstellung (**Bild 2.4**).

Studien zur Rußbildung, die darauf abzielen grundlegende physikalische und chemische Phänomene aufzuzeigen, wurden auch 2018 im Rahmen des nationalen Verbundprojekts Biotto (BMEL) durchgeführt. Auf Basis dieser Studien soll die Rußemission von Benzinmotoren durch den Zusatz von Biokraftstoffen in Benzin verändert werden. Rußbildung und andere Flammeneigenschaften wurden in Laborflammen von Benzin-Surrogat-Mischungen untersucht. Als Referenzkraftstoffe wurden Isooktan und Isooktan/Toluol-Gemische verwendet, während Ethanol und Butanol als repräsentative Komponenten von Biokraftstoffen beigemischt werden. Verschiedene Modellbrennerprüfstände für laminare, vorgemischte und teilvorgemischte Flammen wurden verwendet, um Rußeigenschaften und deren Zusammenhang mit Flammeneigenschaften (z. B. Temperaturprofile und Spezieskonzentrationen) zu erfassen. In den untersuchten, vorgemischten Flammen wurde für alle Gemische aus kohlenwasserstoffhaltigem Referenzbrennstoff und sauerstoffhaltigem biogenen Kraftstoff eine Reduktion des Partikeldurchmessers und damit auch des Rußvolumenbruchs bei nahezu gleichbleibender Partikelanzahl beobachtet. Bei teilvorgemischten Isooktanflammen konnte die Zunahme der Rußbildung mit steigender Vormischung festgestellt werden. Die Beimischung sauerstoffhaltiger biogener Kraftstoffe führte hier, ähnlich wie in vorgemischten Flammen, zu einer Reduktion der Rußbildung. Die Ergebnisse in beiden Flammenkonfigurationen zeigen auch, dass sehr kleine Partikel an Bedeutung gewinnen. Partikelemissionen von Ottomotoren sind auch der thematische Schwerpunkt des DFG-Förderprojektes „Reaktivität von Partikeln aus Ottomotoren: Beziehung zu Partikeleigenschaften und motorische Einflussparameter“. Die Einhaltung der maximal zulässigen Partikelanzahlkon-

zentration, die in der europäischen Abgasgesetzgebung (EURO VI) festgeschrieben ist, stellt für Ottomotoren mit Direkteinspritzung (DE) eine große Herausforderung dar. Zur Einhaltung der Grenzwerte ist daher der Einsatz von Partikelfiltern (GPF) unabdingbar. Deren Regenerationsverhalten ist von der Reaktionsgeschwindigkeit der Partikel mit oxidativen Reaktanden abhängig. Mithilfe von selbstentwickelten TEM/HRTEM Bildauswertungsalgorithmen ist es möglich, sowohl morphologische als auch nanostrukturelle Partikelmerkmale zu bestimmen. Nanostrukturanalysen zeigen soweit, dass der Einfluss des molekularen Partikelbaus auf das Reaktivitätsverhalten weitaus größer ist, als der der morphologischen Partikelcharakteristika (z. B. Durchmesser, fraktale Dimension). Die Ausdehnung, Krümmung und Anordnung der in die Primärpartikel eingebetteten Graphenschichten korreliert exzellent mit der Reaktionsgeschwindigkeit der Oxidationsreaktion. Da die optischen Teilcheneigenschaften eng mit dem molekularen Partikelbau verknüpft sind, lässt sich diese Abhängigkeit auch durch Messung der Absorptionsfunktion bestätigen (**Bild 2.5**).

Im Rahmen des in 2018 gestarteten EU-H2020-Projekts „Emissions Soot Model“ (ESTiMatE) wird das Teilinstitut Verbrennungstechnik zur Entwicklung einer Modellierungsstrategie beitragen, die zur Vorhersage von Kohlenstoffpartikelemissionen (Ruß) aus dem Betrieb von Flugtriebwerken geeignet ist. Dies erfordert die Verbesserung oder Entwicklung anspruchsvoller Modelle für die betreffenden Teilprozesse und eine Validierung anhand von Referenzexperimenten, um eine zuverlässige Prognose der Rußemissionen zu gewährleisten. Ziel der Arbeiten des Teilinstituts im Rahmen des Projekts ist es, Datensätze unter repräsentativen Verbrennungsbedingungen zu generieren, die zur Validierung der entwickelten Mo-



**Bild 2.4:** Vergleich von berechneter und gemessener Flammentemperatur einer Biogas-Luftflamme in einer porösen Struktur bei der Vorwärmtemperatur von 180 °C

delle verwendet werden können. Daher ist eine Reihe von experimentellen Untersuchungen in laminaren Gegenstrommodellflammen von Kerosin und Kerosin-Surrogaten geplant, um den Einfluss von Kraftstoffzusammensetzung und Druck (bis max. 10 bar) auf die Partikelbildung zu klären.

Auch im Rahmen des Helmholtz Programmes „Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen (EMR)“ (Topic 4: „Efficient Use of Fuel Resources“) wurden die Rußbildung und die sie beeinflussenden Flammeneigenschaften untersucht. Ziel ist dabei insbesondere, die Flammenstabilität in einem Flugstromvergaser besser kontrollieren zu können. Daher werden grundlegende Untersuchungen zur Wechselwirkung von Chemie und Strömungsmechanik unter Oxyfuel-Bedingungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Versuchsträger für Modellflammen entwickelt, die es ermöglichen, einerseits eine Vielzahl von Flammenkonfigurationen hinsichtlich Prozess, geometrischer Komplexität und Druckniveau zu untersuchen und andererseits auch Basisdaten für die Validierung numerischer Modelle zu generieren. Im gleichen Projekt wurden auch die Eigenschaften von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten numerisch untersucht. Die Ausgangsstoffe für die Flugstromvergasung sind typischerweise rheologisch komplexe nicht-Newtonsche (NN) Suspensionen mit einer hohen Viskosität und einem scherverdünnenden Verhalten. Um die Berechnung von Sprayeigenschaften auf Basis solcher Flüssigkeiten zu ermöglichen, wurden instationäre 3D-Simulationen des Primärstrahlzerfalls mit der VoF-Methode durchgeführt und dabei die Geometrie der verwendeten Düse vollständig aufgelöst. Diese Simulationen wurden mit experimentellen Daten des Instituts für Technische Chemie des KIT und des Teilinstituts Chemische Energieträ-

ger, Brennstofftechnologie in Bezug auf Zerfallsmorphologie, Zerfallslänge und Zerfallsfrequenz verglichen. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, womit die Anwendbarkeit des Simulationstools auch für rheologisch komplizierte Stoffe nachgewiesen werden konnte.

Im Rahmen des europäischen Projektes SOPRANO werden einerseits die Rußemissionen von modernen Brennkammern für Flugzeugtriebwerke bei realitätsnahen Bedingungen charakterisiert, um die Modelle zur Vorhersage der Rußemissionen und damit das zukünftige Design von schadstoffarmen Brennkammern für Flugtriebwerke zu verbessern. In einem weiteren Arbeitspaket des Projekts wird aber auch die Fähigkeit zum Wiederezünden von Triebwerken in großer Flughöhe, z. B. bei einem Absolutdruck von 0,4 bar und -25 °C Lufttemperatur, untersucht. Daher werden im Rahmen von SOPRANO Zündversuche bei den genannten subatmosphärischen Bedingungen durchgeführt und der Einfluss der Betriebsbedingungen und der Brennkammergeometrie (Luftkühlung, Position Zündung) bestimmt.

Im Rahmen des Förderprogramms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) wurde im Projekt „Entwicklung eines Niederenergiebrenners für Heizöl“ ein innovativer Spraygenerator entwickelt, der es ermöglicht Kleinstdurchsätze an Heizöl zu zerstäuben. Der dazu entwickelte Spraygenerator generiert mittels eines Piezoelementes eine Tropfenkette, wobei der Gesamtmassenstrom für den Zerstäubungsprozess durch Modulation variiert wird. Der Spraygenerator wurde im Rahmen des Projekts in eine Brennkammer integriert und ermöglicht es, einen Brenner stufenlos zwischen sehr kleinen bis zu mittleren Durchsätzen von ca. 7,5 kW zu betreiben.

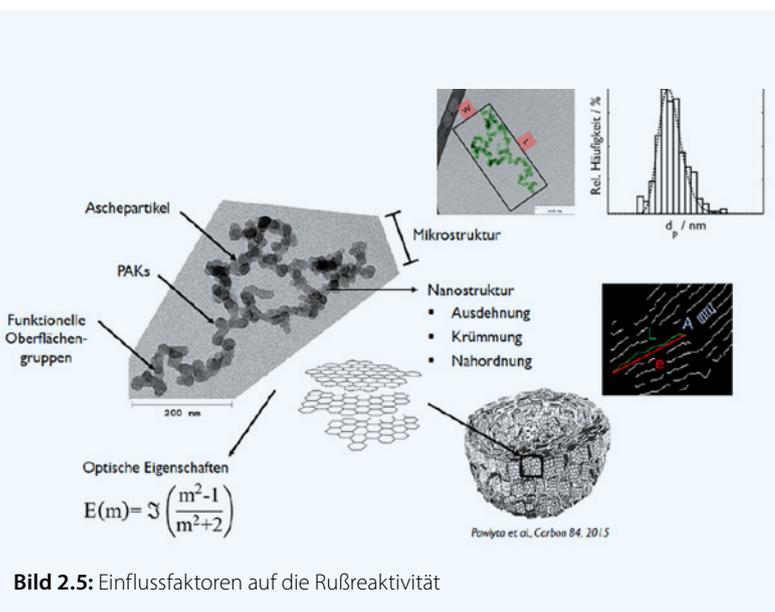
**Bild 2.6** stellt anhand zweier Fotografien den breiten Betriebsbereich des entwickelten Brennerprinzips dar. Auf der linken Hälfte ist das Flammenbild bei minimalem Durchsatz und auf der rechten Bildhälfte bei maximalem Durchsatz dargestellt.

Aus Platzgründen kann hier keine vollständige und detaillierte Übersicht über alle Forschungsarbeiten gegeben werden. Hierzu sei auf direkte Kontakte hingewiesen, die sich einfach über die Internetadresse <http://vbt.ebi.kit.edu> herstellen lassen.

## 2.4 Abgeschlossene Promotionen

Folgende Dissertation wurde abgeschlossen:

**Christopher Wollgarten:** Experimentelle Untersuchung von Ionenströmen bei der Verbrennung mit doppelt verdrahten Luftstrahl-Zerstäuberdüsen (Prof. Dr. Ing. Nikolaos Zarzalis, Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch)



**Bild 2.5:** Einflussfaktoren auf die Rußreaktivität

Aufgrund der durch die Gesetzgebung erlassenen Maßnahmen zum Umweltschutz sowie stetig steigender Passagierzahlen im weltweiten, zivilen Luftverkehr ist die Reduzierung von Abgasemissionen bei der Gasturbinenverbrennung Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die Emission nitroser Gase (NO<sub>x</sub>) ist bei der Verbrennung aufgrund ihrer gesundheitsgefährdenden Eigenschaften besonders in den Fokus gerückt. Eine Verringerung von Stickoxidemissionen wird wegen des dominierenden und stark temperaturabhängigen Zeldovich-NO<sub>x</sub>-Mechanismus durch die Reduzierung der maximal auftretenden Temperaturen in der Brennkammer erreicht. Entscheidend ist dabei die Vermeidung von lokal fetten und folglich heißen Stellen (engl. „Hot-Spots“) innerhalb des Brennraums. Bei diesen entstehen hohe Temperaturen aufgrund unzureichender Vermischung von Kraftstoff und Luft, und somit wird die Bildung von Stickoxidemissionen begünstigt. Die im Luftfahrtbereich vorherrschende Verbrennung von flüssigem Kraftstoff bedingt, dass die Prozesse Zerstäubung, Verdunstung und Mischung im Brennraum parallel verlaufen und von der Verbrennung des Luft-Brennstoff-Gemischs überlagert sind. Im Gegensatz dazu wird bei der direkten mageren Verbrennung die gesamte Verbrennungsluft durch die Brennerdüse in den Brennraum geleitet und so der Verbrennungsprozess von der Gemischaufbereitung getrennt. Dadurch entsteht bei gleichem Bauraum wie bei konventionellen und nicht direkt mager betriebenen Verbrennungskonzepten ein etwa dreimal so hoher Luftdurchsatz, und damit verbunden entstehen auch höhere Strömungsgeschwindigkeiten. Um eine Stabilisierung der Flamme zu gewährleisten, wird die Strömung innerhalb der Brennerdüse verdrallt und ein Rückstromgebiet im Brennraum generiert. Durch Bildung der Rückströmung werden Zonen mit niedrigerer Geschwindigkeit bei gleicher mittlerer Verweilzeit generiert, in denen sich die Flamme stabilisieren kann. Es entsteht eine kompakte, kurze Flamme mit hoher Reaktionsdichte. Die aerodynamische Flammenstabilisierung und das große Luft-Brennstoff-Verhältnis (LBV) führen leider auch zu einer Anfälligkeit für dynamische Verbrennungsinstabilitäten, die aufgrund der Sicherheitsanforderungen an die Verbrennung in einem Triebwerk unbedingt vermieden werden müssen. Die Herausforderung bei diesem Verbrennungskonzept besteht also darin, die Verbrennung bei mageren Bedingungen stabil und nahe der mageren Verlöschgrenze zu betreiben. Damit ein mageres Verlöschen der Flamme aus Sicherheitsgründen vermieden wird, ist eine aktive Flammenüberwachung in den Fokus der Entwicklung gerückt. Die Flammenüberwachung soll im Rahmen dieser Arbeit durch Ionenstromsonden durchgeführt werden. Der Vorteil der Ionenstrommesstechnik liegt im

robusten und einfachen sowie kostengünstigen Aufbau der Sonden.

In der Vergangenheit wurden bereits Ionenstromsensoren zur Bestimmung der Wärmefreisetzung verwendet, jedoch von optischen Messtechniken wie z. B. der Chemilumineszenz verdrängt. Deshalb wurden im Verlauf dieser Arbeit die Ionenstromsignale mit bekannten Messtechniken wie z. B. der dynamischen Druckmesstechnik oder der OH\*-Chemilumineszenz verglichen. Zur Messung von Ionenströmen in Flammen werden sogenannte Langmuir-Sonden verwendet. Eine solche Sonde besteht aus einer Mess- und einer Referenz-Elektrode. Die Mess-Elektrode ist klein und kann mit einer positiven oder negativen elektrischen Vorspannung versehen werden. Die Referenzelektrode hat im Vergleich zur Messelektrode eine große Oberfläche, so dass beispielsweise der Körper der Sonde als Referenzelektrode verwendet werden kann. Der Unterschied in der Oberfläche dient als Absicherung dafür, dass der gemessene Strom durch die definierte Größe der Messelektrode limitiert ist und nicht umgekehrt. Eine positive oder negative Vorspannung der Sonde erlaubt die Unterscheidung von positiven und negativen Ladungsträgern. Die Experimente wurden zum Großteil an einem bei Umgebungsdruck (atmosphärisch) betriebenen Prüfstand durchgeführt. Zur Beurteilung des Druckeinflusses auf die Ionenstrommesstechnik wurden jedoch auch Untersuchungen an einem Versuchsträger bei Überdruck durchgeführt. Die Komplexität der Versuchsanlage steigt dabei aufgrund der hohen thermischen Leistungen und des großen Luft- und Kraftstoffbedarfs im Vergleich zu einem bei Umgebungsdruck betriebenen Prüfstand.

Der prinzipielle Aufbau einer Sondenspitze ist in **Bild 2.7** anhand der Ausfertigung für den Druckbetrieb als Schnitt und als Photographie dargestellt. Sie besteht aus einer Platinperle, die als Kathode dient und die elektrisch vorgespannt wird. Die Zuleitung der Perle, die durch den Sondenkörper verläuft, ist von diesem durch ein Aluminiumoxidrohr elektrisch isoliert. Der Sondenkörper selbst ist aus Metall gefertigt und dient als elektrische Anode.

Die Ionenstrommesstechnik wurde bei der Variation von technisch relevanten Betriebsparametern charakterisiert. Es wurden die Luft-Vorwärmtemperatur, der Druckverlust über der Düse, das Luft-Brennstoffverhältnis und der Kammerdruck variiert und verschiedene Messtechniken zur Interpretation des Ionenstromsignals eingesetzt. Die Verbrennungakustik wurde mit dynamischen Druckaufnehmern vermessen, während die Wärmefreisetzungsrates durch OH\*-Chemilumineszenz-Aufnahmen mittels einer Highspeed-Kamera erfasst wurde.

Um die Anwendbarkeit der Ionenstrommesstechnik für die Vorhersage des Verlöschens zu beurteilen, wurde

ein Vergleich mit anderen Messtechniken, bei im Mittel stationären Versuchsbedingungen, durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Betriebsparameter wie das LBV, die Luft-Vorwärmtemperatur und der Druckverlust über die Düse variiert. Die Analyse der Ergebnisse wurde sowohl im Zeitbereich, wie auch im Frequenzbereich mit dem Fokus auf dominante Frequenzanteile durchgeführt. Bei der Variation des Luft-Brennstoffverhältnisses wurde zunächst die sehr gute Korrelation zwischen der Schwankung des Ionenstromsignals und der OH\*-Intensität aufgezeigt.

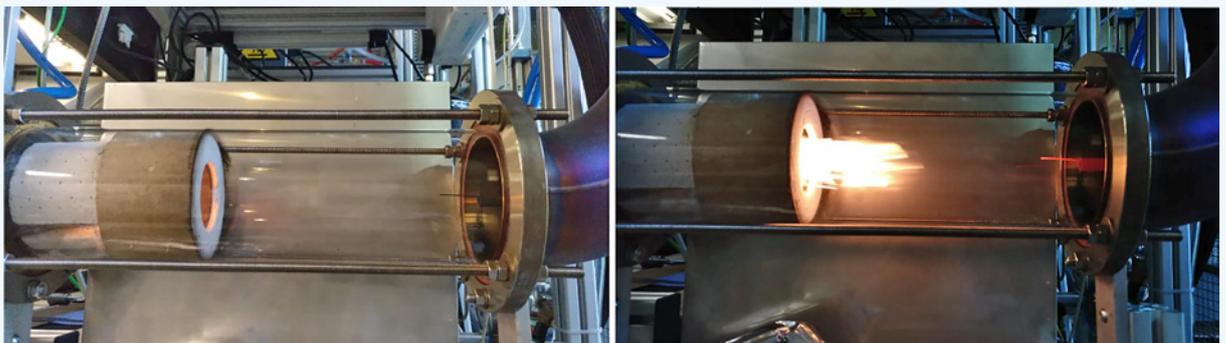
Die Variation der Luft-Vorwärmtemperatur zeigt bei den Ergebnissen der OH\*-Messungen eine Verschiebung der Reaktionszone von der Wand in Richtung Symmetrieachse und in Richtung Düsennähe mit steigender Vorwärmtemperatur. Die Temperatur- und Ionenstrommessungen bestätigen diese Beobachtungen (**Bild 2.8**). Die Variation des Druckverlusts zeigt eine hohe Übereinstimmung von Ionenstromschwankungswerten und OH\*-Chemilumineszenz und deckt sich mit den Erklärungen und Beobachtungen der Stabilitätsgrenzen.

Die bei erhöhtem Betriebsdruck erzielten Ergebnisse zeigen, dass die radialen Profile der Ionenstromschwankungsanteile keinen Anstieg mit steigendem Kammerdruck aufweisen, wie aufgrund der gesteigerten thermischen Leistung und der damit verbundenen erhöhten volumetrischen Wärmefreisetzung zu erwarten wäre. Der Ionenstrom ist hingegen druckunabhängig, weil die Molanteile der Ionen konstant bleiben. Ein Vergleich mit Messungen bei atmosphärischen Versuchsbedingungen zeigt, dass die Schwankung des Ionenstromsignals die Wärmefreisetzung in großen, turbulenten Strukturen beschreibt. Diese Wirbel reagieren direkt auf steigende Geschwindigkeitsschwankungen durch eine zunehmende Auslenkung. Ein steigender Druckverlust über der Düse beeinflusst folglich auch die Schwankung des Ionenstromsignals. Bei erhöhtem Kammerdruck ändert sich die Größe der großen Wirbel nicht und infolgedessen bleibt auch die Schwankung des Ionenstromsignals druckunabhängig. In Bezug auf die Stabilität erhöht der Betriebs-

druck die turbulente Flammengeschwindigkeit und somit auch die magere Verlöschgrenze, wodurch sich die Flamme weiter stromaufwärts stabilisieren kann. Ist der Betriebsdruck ausreichend hoch, zeigen die Profile der Ionenstromschwankungen ausgeprägte Maxima, die einem Flammenumschlag zuzuschreiben sind. Diese These wird mit den Konzentrationsmessungen von Stickoxiden unterstützt, die im Falle eines Ionenstrommaximums ebenfalls erhöhte Werte aufweisen. Die gesteigerte Flammengeschwindigkeit ermöglicht die Verbrennung in Düsennähe, wodurch weniger Zeit für die Tropfenverdampfung zur Verfügung steht. Infolgedessen entstehen Hot-Spots und somit höhere Stickoxidemissionen sowie ein Anstieg des Ionenstromsignals. Der Flammenumschlag konnte weiterhin akustisch bei dem Betrieb der Anlage wahrgenommen werden und zeigte sich zusätzlich durch einen Anstieg des Druckverlusts über der Düse.

Dynamische Verbrennungsinstabilitäten wurden anhand der Ergebnisse bei atmosphärischem Kammerdruck analysiert. Die Fourier-Transformationen der Ionenstrom-, Druck- und Temperatursignale zeigen die Frequenzspektren und erlauben die Identifizierung verschiedener dominanter Moden. Zur Beschreibung akustisch transportierter Wellen innerhalb der Versuchsanlage wurden zunächst die Spektren des dynamischen Drucks für den primären und sekundären Drallgenerator sowie für die gesamte Brennerdüse aufgezeichnet. Der für Drallströmungen typische präzedierende Wirbelkern (PVC) zeigt seinen Ursprung im primären Drallgenerator und weist, wie zu erwarten, eine konstante Strouhal-Zahl auf. Weitere dominante Frequenzen sind auf die Dimensionen des Verbrennungsprüfstands zurückzuführen und wurden als Eigenfrequenzen identifiziert. Kopplungen mit der Strömung zeigen sich als hydrodynamische Instabilitäten, deren Frequenz abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist. Bei überlagerter Verbrennung traten zusätzlich Interaktionsfrequenzen als Differenz der PVC-Frequenz und der akustischen Instabilität auf, die von anderen Autoren bei vorgemischter Methanverbrennung ebenfalls beobachtet wurden. Die Analyse der Wärmefreisetzungs-

**Bild 2.6:** Innovativer Ölbrenner bei minimalem (links) und maximalem Durchsatz (rechts)



spektralen offenbart schließlich thermoakustische Instabilitäten. Die Ionenstrom- und Temperaturmessungen ermöglichen die Transformation des Signals an jedem Messpunkt in den Frequenzraum. In jedem so berechneten Spektrum können dann mit einem Algorithmus die dominanten Frequenzen isoliert werden. Somit wird für jede dominante Frequenz die räumliche Darstellung in einem Kontur-Diagramm möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass der Bereich der thermoakustischen Instabilität im Ionenstromsignal deckungsgleich mit dem Bereich hoher OH\*-Intensität ist. Die Temperaturmessungen weisen diese Mode zusätzlich noch in der äußeren und inneren Scherschicht der Strömung auf (**Bild 2.8**). Die PVC-Frequenz wird sowohl vom Ionenstrom- wie auch dem Temperatursignal erfasst, während das Chemilumineszenz-Signal davon abweichend keine Beeinflussung aufweist. Somit qualifiziert sich die Ionenstrommesstechnik zur punktuellen Erfassung von Verbrennungsschwankungen, die mit der optischen Methode der OH\*-Messtechnik nicht erkannt werden.

Zur Bewertung der Eignung der Messmethode zur Prognose der Flammenverlöschung, wurden Signale bei transienten Versuchsbedingungen aufgezeichnet und entsprechend der nachfolgenden Ereignisse analysiert. Dazu wurde zunächst das zeitliche Antwortverhalten des Ionenstromsignals bewertet, da bei Verwendung einer Rückkopplungsschleife bzw. einer Regelung ein entsprechend schnelles Eingreifen notwendig ist. Zu diesem Zweck wurden simultan die OH\*-Chemilumineszenz und das Ionenstromsignal während einer Abmagerung (Reduzierung des Kraftstoffmassenstroms) aufgezeichnet. Die Ionenstrommessung zeigte im Vergleich mit der optischen Messmethode keinen Zeitverzug, so dass das Antwortverhalten als ausreichend schnell interpretiert werden kann.

Darauf aufbauend wurde in dieser Arbeit ein Kriterium entwickelt, dass die mageren Verlöschung der Flamme vor dem eigentlichen Ereignis aus dem Ionenstromsignal prognostiziert. Dabei wurde das Ionenstromsignal physikalisch interpretiert, so dass das stochastisch erscheinende Signal einen Bezug zum Verbrennungsprozess und der Strömungsmechanik erhält. Die Prognose der Verlöschung hat somit nicht bloß einen rein empirischen Charakter. Die Ergebnisse zeigen, dass die in dieser Arbeit ausgearbeitete Methode für die verwendete Brennerdüse funktioniert und somit entsprechend für andere Düsenkonzepte zur Vermeidung der mageren Verlöschung adaptiert werden kann.

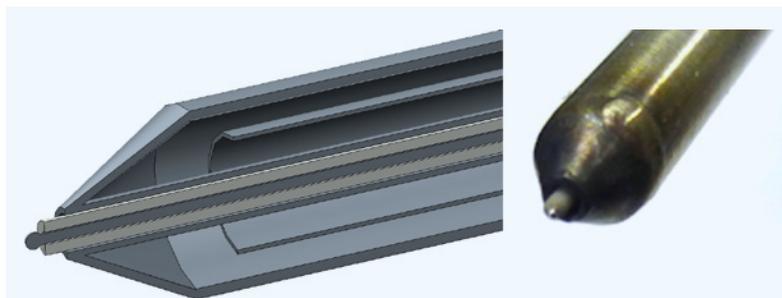
## 2.5 Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB)

### Personelle Veränderungen

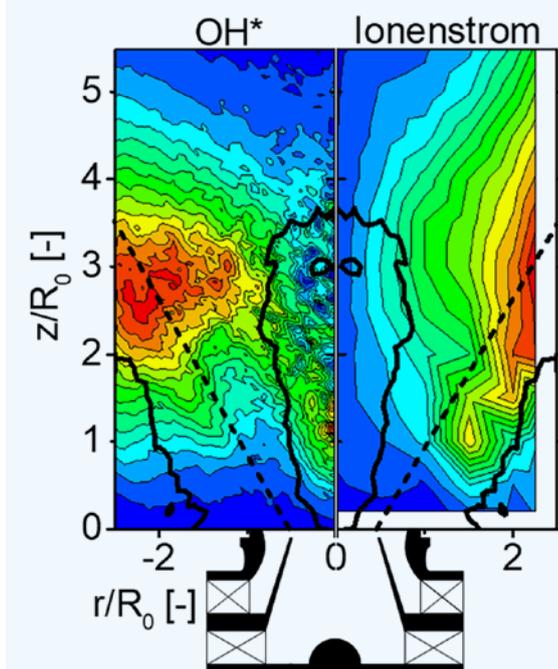
Dr.-Ing. *Ilian Dinkov* übernahm im März 2018 die stellvertretende Leitung der Forschungsstelle. Im Jahr 2018 wurden zwei Promotionsstellen an der FFB besetzt. M. Sc. *M. Vetter* promoviert unter der Leitung von Prof. *Zarzalis* und beschäftigt sich mit dem Thema „Untersuchung der Interaktion von eingedüsten Wassertropfen und Flammen“. Dipl.-Ing. *D. Max* promoviert unter der Leitung von Prof. *Trimis*. Sein Thema ist die statistische Untersuchung der Einflussparameter von Bränden und deren Auswirkung auf Ergebnisse von Brandsimulationsrechnungen.

### IMK-Themen

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik ist u. a. von den Ländern beauftragt, anwendernahe Forschung für die Feuerwehren durchzuführen. Im Jahre 2018 wurde dazu ein Forschungsbericht mit dem Titel „Untersuchung zur Gefährdungslage durch Glasstaub bei Einsätzen der



**Bild 2.7:** CAD-Darstellung der Sondenspitze im Schnitt für die Druckanlage (links) und Photographie (rechts)



**Bild 2.8:** Konturflächen der kompakten Flamme mit der entabellten OH\*- Intensität links und dem Ionenstrom-RMS rechts

technischen Hilfeleistung bei Verkehrsunfällen“ fertiggestellt und veröffentlicht.

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

2018 wurde wie schon die Jahre zuvor an der Landesfeuerwehrschule Unterricht für die Lehrgangsteilnehmer des höheren und gehobenen Dienstes gehalten. An der Akademie für Gefahrenabwehr wurden die Seminare „Besonderheiten und Risiken der Elektromobilität“ sowie „Vorbeugender Brandschutz“ durchgeführt.

An der Forschungsstelle wurden 2018 zahlreiche Batterien aus dem Automobilbereich standardisierten Beflammungstests, u. a. nach ECE R100, unterworfen (Bild 2.9). Hierzu wurde der aus Edelstahl gefertigte Prüfstand komplett neu entworfen. Im Wesentlichen besteht er aus einer SPS-gesteuerten Mechanik mit zwei Kettenzügen, die mit Softanlauf ausgestattet sind.

**Forschungsprojekte und Grundlageuntersuchungen**

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Verein zur Förderung von Ingenieurmethoden im Brandschutz wurde die Interaktion zwischen ortsfesten, automatischen Wasserlöschanlagen, Brandereignis und Rauchschicht in einem 36 m<sup>2</sup> großen Brandraum experimentell sowie numerisch untersucht. Dabei konnte bei den zwei durchgeführten Versuchen eine Zerstörung der stabilen Rauchschicht beobachtet werden. Nach der Sprinklerauslösung mit einer horizontal großflächigen Verteilung von kleinen langsamen Tröpfchen wurde das Rauchgas ausgewaschen und die optische Dichte nahm damit lokal ab (Bild 2.10 a).

Zusätzlich wurde jedoch die Rauchgrenzschicht in Richtung Boden verschoben, so dass die Verrauchung damit global zunahm. Nach der Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN) wurden hingegen die Rauchgase durch den hohen Tropfenimpuls mitgezogen und im Brandraum rezirkuliert (Bild 2.10 b). Damit blieb die lokale Rauchdichte ähnlich, verteilte sich jedoch auf den gesamten Brandraum.

Die zwei durchgeführten Konfigurationen wurden auch numerisch mit Hilfe des CFD-Programms ANSYS CFX untersucht. Die Ergebnisse der numerischen Berechnung wurden mit den experimentellen Daten verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung bezüglich Temperaturprofil, Rauchschichtdichte und Position. Die numerische Simulation konnte auch die Haupteffekte (nach der Sprinkler- bzw. HDWN-Aktivierung) wiedergeben, nämlich den Kühleffekt nach der Sprinklerauslösung, in dem die Rauchschicht komplett ausgewaschen wurde (Bild 2.10 c), sowie die von der HDWN-Anlage erzeugte Zugkraft und die nachfolgende Rauchgasrezirkulation, wie in Bild 2.10 d dargestellt. Bei beiden Versuchen wären die Flucht- und Rettungswege infolge der Auslösung der Löschanlagen stark verraucht und für ungeschützte Personen unpassierbar geworden.

**2.6 DVGW-Forschungsstelle und Prüflaboratorium Gas**

Die Abteilung Gasanwendung unter der Leitung von Dr. Jens Hoffmann (Nachfolge Dipl. Ing. Jürgen Stenger) teilt sich in drei Abteilungen auf. Diese sind die Abteilungen Gasanwendung, Armaturen und Forschung. Schwerpunkt bis dato ist der Prüfbereich, der durch die beiden erstgenannten Abteilungen bearbeitet wird. Nachfolgend wird daher nur von dem Bereich Prüflaboratorium (Gasanwendung und Armaturen) und Forschung die Rede sein.

**Prüflaboratorium Gas**

Das Prüflaboratorium ist von der deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) als Prüflabor nach der DIN EN ISO 17025 anerkannt und prüft für verschiedene notifizierte Stellen nahezu jedes Produkt im gasfachlichen Markt vom Bunsenbrenner bis zum O-Ring. Letztere werden durch den Bereich Materialprüfung innerhalb des Bereiches Gastechnologie durchgeführt (siehe dortigen Bericht). Die Akkreditierungen und Anerkennungen erfolgten im Einzelnen in folgenden Bereichen bzw. Richtlinien:

- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- Sicherheit elektrischer Betriebsmittel (SEB)
- Materialprüfungen an Produkten der Gasverteilung und -verwendung



Bild 2.9: ECE R100 Prüfstand

- Probenahme und ausgewählte Prüfungen von Brennstoffen
- Einrichtungen und Ausrüstungsteile in der Gasanwendung und -versorgung
- Prüfung von Bauprodukten gemäß Verordnung (EU) Nr. 305/2011
- Prüfungen nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
- sowie seit der ab April 2018 geltenden Gasgeräteverordnung (EU)2016/426 (GAR).

Weiterhin wurde dem Prüflaboratorium als einzige Gas-Prüfstelle auch die Kompetenz für die „interne Kalibrierung“ von Temperaturmesseinrichtungen und Klimaschränken bescheinigt. International ist die Prüfstelle auch für IECCE-Prüfungen anerkannt („CB Testing Laboratory“). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es somit dem Labor möglich ist, Prüfungen aller Komponenten und Materialien sowie Sicherheitseinrichtungen, der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischer Phänomene im Komplettpaket durchzuführen.

Daneben besteht außerdem die Anerkennung als Prüflabor für DIN CERTCO für Warmluftferzeuger, Ölbrenner- und -heizkessel, Temperaturregel- und Begrenzungseinrichtungen 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. Im Themenfeld der Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie (Richtlinie 2009/125/EG), die u. a. auf die europäische Verordnung 813/2013 verweist, welche die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von gas- und ölbetriebenen Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten regelt, wurden durch Mitarbeiter/innen des Prüflaboratoriums Vorsitz und Sekretariat des europäischen Beratergremiums der benannten Stellen (ECOBED-AC) übernommen.

### **Normungsbezogene Projektarbeiten im Prüflaboratorium Gas**

Im Berichtszeitraum wurde eine durch die Europäische Kommission beauftragte Untersuchung begonnen, welche die Darstellung der bestehenden Situation der Re-

produzierbarkeit, Wiederholbarkeit und Unsicherheit zu den im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie festzustellenden Parametern für Wärmeerzeugungsanlagen zum Ziel hat. Mitarbeiter/innen des Prüflaboratoriums unterstützen diese Untersuchungen im Rahmen des europäischen Konsortiums „ECOTEST“ mit Laborversuchen an unterschiedlichen Technologien (Kombiwasserheizer, mKWK-Geräte mit Verbrennungsmotor, Stirling, Brennstoffzelle) sowie durch Analysen von durchgeführten Ringversuchungen und Entwicklungen von Empfehlungen zur Verbesserung der normativen Umsetzung.

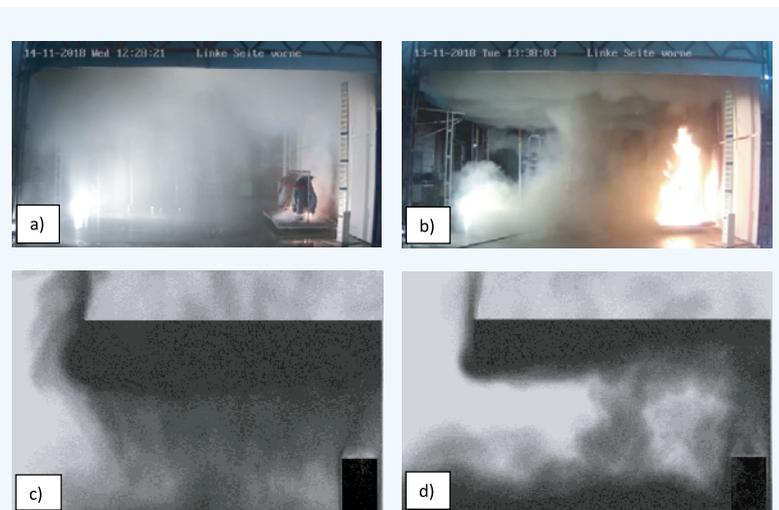
Ein weiteres nationales Projekt konnte im letzten Quartal 2018 begonnen werden. In diesem geht es um nicht zertifizierte Verschraubungssysteme im Anlagenbau, die über eine neu definierte Prüfung in Zukunft für den Anlagenbau geprüft werden sollen bzw. können. Erste Messungen zeigen positive Ergebnisse, so dass aktuell davon auszugehen ist, dass die Lücke im Regelwerk im Laufe des Jahres 2019 geschlossen werden kann.

### **Forschungsaktivitäten im Prüflaboratorium Gas in 2018**

Die Forschungsschwerpunkte lagen im Jahr 2018 in den verknüpften Arbeiten zu Fragen der Gasbeschaffenheit (Gaszusammensetzung), erneuerbaren Gasen, modernen Verbrennungsregelungen, CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Rauchgasen und der Sektorenkopplung.

### **Hauptstudie Gasbeschaffenheit – Phase II**

Ziel des DVGW-Projektes „Hauptstudie Gasbeschaffenheit – Phase II“ (DVGW-Projekt G 1/01/15-PHASE-II) war es, ein verträgliches und wirtschaftliches Gasbeschaffenheitsband für den deutschen Geräte- und Anlagenbestand zu definieren, welches die Einhaltung der ge-



**Bild 2.10:** Zerstörung der stabilen Rauchschiicht a) Sprinkler (experimentell); b) HDWN (experimentell); c) Sprinkler (numerisch); d) HDWN (numerisch)

setzlichen Vorgaben bezüglich Sicherheit, Emissionen und Effizienz weiterhin gewährleistet. Die seit dem 01.09.2016 laufende Phase II der Hauptstudie konnte mit den Projektpartnern DBI und GWI in 2018 mit dem Abschlussbericht abgeschlossen werden. Die umfangreichen anwenderseitigen Untersuchungsergebnisse im Rahmen der Studie (Felddatenerfassungen, Bestandsanalyse durch die Hersteller und Anlagenbetreiber) zeigten als gemeinsamen Konsens, dass Gasgeräte und -anlagen mit einer *Wobbe*-Index-Bandbreite von 13,6 kWh/m<sup>3</sup> bis 15,3/15,4 kWh/m<sup>3</sup> (25 °C/0 °C) und einer lokalen Schwankungsbreite des *Wobbe*-Index von ±2 % sicher, effizient und emissionsarm betrieben werden können. Eine beispielhafte Schwankungsbreite mit den H- und L-Gas-Bereichen ist im Brennwert-*Wobbe*-Index-Diagramm in **Bild 2.11** dargestellt. Zusätzlich zeigt das Diagramm einige verteilte Grundgase und Prüfgase aus der DIN EN 437:2009 bzw. für K-Gas NTA 8837:2012, mit denen der sichere Betrieb über die gesamte Bandbreite der jeweiligen Gasgruppe (H, L oder K) bei der Baumusterprüfung nach der Gasgeräterichtlinie bzw. Gasgeräteverordnung (GAR) nachgewiesen wird.

Bei 533 Gasgeräten der Felddatenerfassungen an den drei Standorten Klanxbül/Neukirchen (deutsch-dänische Grenze), Leipzig und abschließend in 2018 Dortmund konnte das Pendeln zwischen zwei Grundgasbeschaffenheiten mit einem  $\Delta W_{s,n} \approx 0,2$  bis  $0,4$  kWh/m<sup>3</sup> ( $\Delta W_{s,n} \approx 3\%$ ) analysiert werden. Hier treten bei den dort eingestellten Geräten vermehrt relativ magere bis fette Luftzahlstellungen auf. Damit sind die Arbeitsfelder für einige Geräte nennenswert verschoben. Trotz dieser Verschiebung und Verteilungsbreite lag die Anzahl an festgestellten CO-Mängeln auf sehr niedrigen Niveau (je

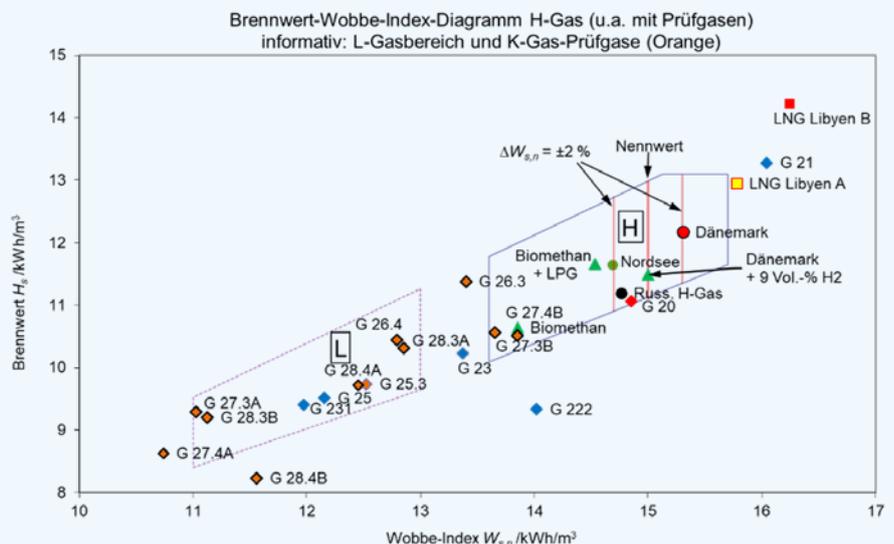
0,6 % Mängel für 500 bis <1.000 Vol.-ppm und  $\geq 1.000$  Vol.-ppm CO) aufgrund des bei häuslichen Geräten üblichen hohen Luftzahlpuffers, siehe **Bild 2.12**. Die Analysen speziell im häuslichen Sektor zeigen, dass robuste (Werks-)Einstellungen bereits Gasbeschaffenschwankungen kompensieren können. Aus den Analysen ist damit als wesentliche Handlungsempfehlung für alle Sektoren abzuleiten, dass keine Einstellung ohne Kenntnis der vorliegenden Gasbeschaffenheit erfolgen sollte. Dazu wurde für alle Sektoren auch empfohlen, die Arbeitsbereiche von Gasanwendungen bezüglich der Gasbeschaffenheit zu bestimmen. Das Konzept der GAR bzw. von Produktnormen mit Prüfgasen aus der DIN EN 437:2009 kann dabei zur Orientierung dienen.

**MemKoR**

Die Untersuchungen zu Membranverfahren für die Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Kraftwerksrauchgasen im Projekt MemKoR sollen einen weiteren Weg zur CO<sub>2</sub>-Reduktion über CCS bzw. CO<sub>2</sub>-Nutzung neben den Wäscherverfahren aufzeigen. Hier standen in 2018 an den DVGW-Laborprüfständen die Charakterisierung tubularer keramischer Membranen des Projektpartners IEK-1 aus Jülich an, die für die Applikation aber geringere Selektivitäten, Permeanzen und Stabilität gegenüber den Polymermembranen vom PolyActive®-Typ zeigten.

Bei der Pilot-Containeranlage im Schornstein des Rheinhafen-Dampfkraftwerkblocks 8 der EnBW wurde in 2018 der Ringflüssigkeitsverdichter im Pumpbetrieb in Betrieb genommen. Bei den bisherigen Untersuchungen, u. a. auch mit Aerosolmessungen, zeigte sich aber bei dem größeren Ringflüssigkeitskompressor eine geringere Abtrennwirkung von sauren Schwefelaerosolen, als bei

**Bild 2.11:** Brennwert-*Wobbe*-Index-Diagramm für L- und H-Gas nach DVGW G 260 mit einigen verteilten Grundgasen und Prüfgasen und einem beispielhaft eingezeichneten *Ws*-Schwankungsintervall von ±2 % um den Nennwert von 15,0 kWh/m<sup>3</sup> (25 °C/0 °C)



dem kleinen Ringflüssigkeitskompressor der Voruntersuchungen in 2017. Durch verbesserte Filter konnte aber die Membranstandzeit erhöht werden. Die Untersuchungen zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung mittels Membranverfahren laufen noch im Jahr 2019 fort.

**Sektorenkopplung**

Die zwei Projekte „RegEnKibo“ (BMWi) und „Smart District“ (DVGW) zur Sektorenkopplung wurden in 2018 abgeschlossen. In „RegEnKibo“ wurden speziell die in 2017/18 aufgezeichneten Objektdaten von vier BHKW- und zwei Elektrowärmepumpen aufbereitet und analysiert, inwieweit die Anlagen lastflexibel mit dem Ziel der Residuallastminimierung des Stromnetzes gefahren werden können. Dabei erfolgten die Analysen unter den Aspekten

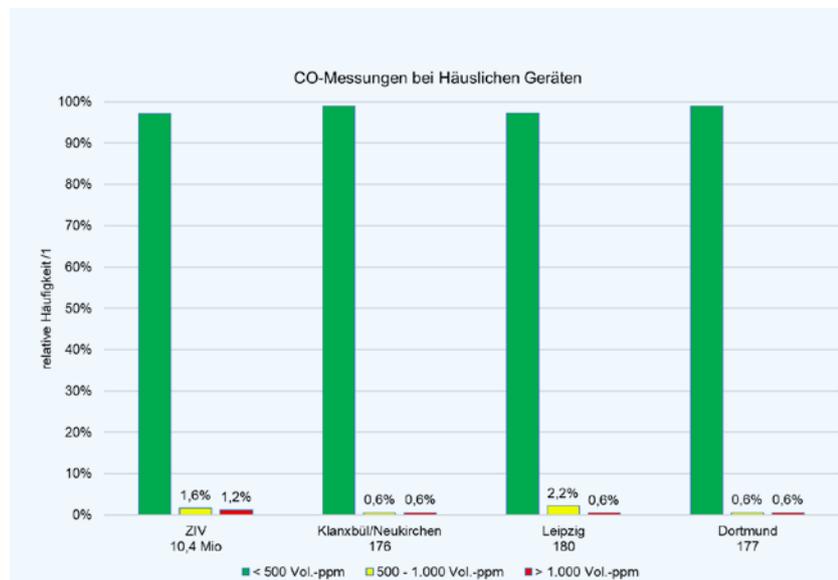
1. Valenz: Flexibilität bezüglich des Primärenergieträgers bzw. der Produkte
2. zeitliche Reichweite: kurzzeitige oder langzeitige bis saisonale Flexibilität

Der 1. Punkt adressiert, ob eine Objektenergieversorgung bezüglich des eingesetzten Primärenergieträgers (Gas oder Strom) und der erzeugten Energieformen (Wärme und ggf. Strom) flexibel durch eine übergeordnete Netzsteuerung angesteuert werden kann. Der 2. Punkt beschreibt vor allem die zeitliche Flexibilität, um Lasten von der übergeordneten Netzsteuerung aus ungünstigen Zeitfenstern in günstigere zu verschieben, um Spitzenlasten und damit Residuallasten zu minimieren. Die übergeordnete Netzsteuerung sollte dabei den 1. und 2. Punkt kombiniert berücksichtigen.

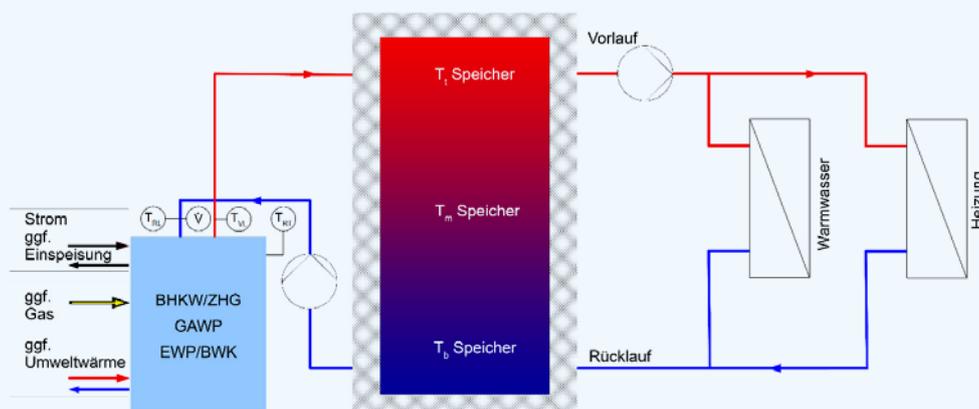
Multivalente Anlagen wie Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Zusatzheizgeräten (ZHG) oder die Kombination aus Elektrowärmepumpen (EWP) mit Brennwertkessel (BWK) wie in **Bild 2.13** dargestellt könnten gemäß den Analysen größere Beiträge zur Residuallastminimierung leisten. Dies spiegelt sich bislang aber kaum in den Real-

daten wieder, da die Anlagen meist ausschließlich wärmegeführt betrieben werden und häufig nicht in eine Art „Smart Grid“ integriert sind. Es konnten zudem Optimierungen für die Anlagensteuerungen speziell anhand der Temperaturprofile der Pufferspeicher aufgezeigt werden.

Bei dem DVGW-Projekt „Smart District“ wurden die Sektorenkopplungspotenziale von einem Modellquartier (hier: Lindenberg im Allgäu) anhand von Lastprofilen für verschiedene Energieträger, Objekttypen (Sektoren Haushalt, GHD, Industrie) und für verschiedene Szenarien bezüglich der Kopplungsmöglichkeiten analysiert. Übergeordnetes Ziel war hier die CO<sub>2</sub>-Reduktion auf der Quartiersebene, als Szenarien wurden Konzepte aus dem Energiekonzept, der Innovationsoffensive und der dena „Gebäudestudie 2017“ durchgerechnet. Im (klein-)städtischen

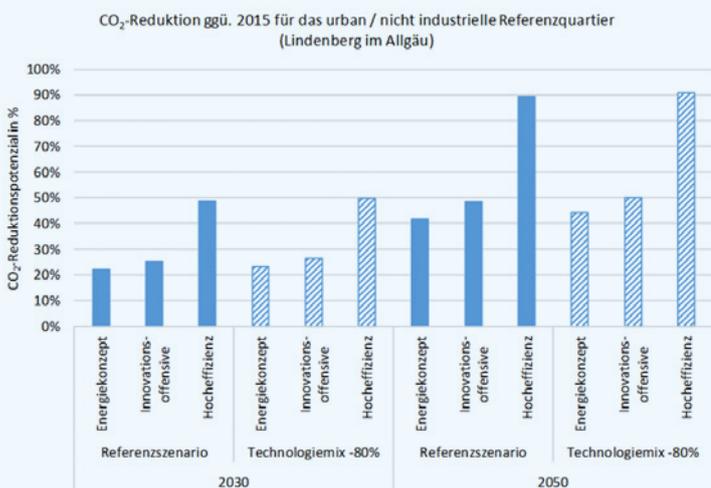


**Bild 2.12:** Vergleich der Mängel aufgrund von CO-Messungen für die drei Felddatenerfassungen und die bundesweiten ZIV-Messungen 2015, Wertebereiche in Vol.-ppm

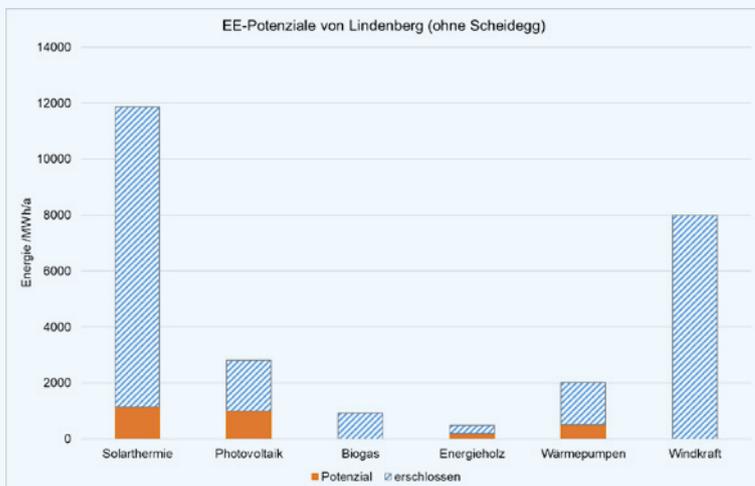


**Bild 2.13:** Beispielhaftes Schema für Objektenergieversorgungen mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern

Modellquartier Lindenberg konnten anhand von Recherchen keine relevanten Abwärmquellen aus Industrie oder Gewerbe identifiziert werden. Statt der Kopplung der strukturellen Sektoren wurden die intrasektorale Kopplung zum Beispiel mittels multivalenter Objektenergieversorgungen bzw. die Entwicklungen des Wärmeerzeugerbstands anhand von Szenarien wie z. B. dem „Technologiemix -80%“ nach der dena „Gebäudestudie 2017“ betrachtet. **Bild 2.14** zeigt die für die Szenarien „Energiekonzept“, „Innovationsoffensive“ und „Hocheffizienz“ für die beiden Entwicklungspfade „Referenzszenario“ und „Technologiemix -80%“ prognostizierten CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale für die Stützjahre 2030 und 2050.



**Bild 2.14:** Strom- und gasbedingte CO<sub>2</sub>-Reduktion für das urbane/nicht industrielle Referenzquartier (Lindenberg im Allgäu) zum Status Quo, 2030 und 2050 in den Szenarien „Energiekonzept“, „Innovationsoffensive“ und „Hocheffizienz“ für die Entwicklungspfade „Referenzszenario“ und „Technologiemix -80 %“



**Bild 2.15:** Graphische Darstellung der EE-Potenziale für die Stadt Lindenberg

Nur im „Hocheffizienz“-Szenario mit einem erhöhten Anteil von EE-Gasen können die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele erreicht werden. Dazu sollten für das übergeordnete Ziel der CO<sub>2</sub>-Minderung auch die in **Bild 2.15** gezeigten EE-Potenziale vor Ort erschlossen werden. Im Modellquartier vor Ort bieten die Dach- und Fassadenflächen für solarthermische bzw. Photovoltaikanlagen das größte Potenzial. Biomasse, Windkraft und indirekt damit auch Power-to-Gas-Konzepte spielen eine größere Rolle, wenn die Betrachtungen über die Quartiersgrenzen hinaus gehen.

Für beide Projekte zur Sektorenkopplung lassen sich zur Minimierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. der Residuallasten folgende Handlungsempfehlungen ableiten, dabei sind die zunehmende Elektrifizierung des Wärme- und Mobilitätssektors zu beachten:

- Entwicklung, Umsetzung und Ausbau einer intelligenten Netzsteuerung,
  - Ausbau multivalenter Objektenergieversorgungen mit BHKW oder bivalenten Wärmepumpen,
  - Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten gekoppelt mit dem
  - Ausbau von Langzeitspeichermöglichkeiten,
- um die Bedarfsgerechtigkeit zwischen den Erneuerbaren Energien und den Verbrauchern herzustellen. Die Untersuchungen werden in Folgeprojekten vertieft und fortgesetzt.

#### Veröffentlichungen EBI vbt 2018

Alomar, O. R.; Mendes, M. A. A.; Ray, S.; Trimis, D. (2018): Numerical investigation of complete evaporation process inside porous evaporator using staggered and non-staggered grid arrangements. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, 56-72, (doi:10.1016/j.ijthermalsci.2018.02.022)

Bhagwan, R.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N. (2018): Experimental and Numerical Investigations of Characteristics of an Axial Jet in the Vicinity of a Confined Concentric Swirl Flow in a Model Combustor, in *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2018)*, ASME, June 11-15, Oslo, Norway, GT2018-75028, (doi:10.1115/GT2018-75028)

Schollenberger, D.; Bajohr, S.; Gruber, M.; Reimert, R.; Kolb, T. (2018): Scale-Up of Innovative Honeycomb Reactors for Power-to-Gas Applications – The Project Store&Go. *Chem. Ing. Tech.*, 90 (5), 696-702, (doi:10.1002/cite.201700139)

Giglio, E.; Deorsola, F. A.; Gruber, M.; Harth, S. R.; Morosanu, E. A.; Trimis, D.; Bensaid, S.; Pirone, R. (2018): Power-to-Gas through High Temperature Electrolysis and Carbon Dioxide Methanation: Reactor Design and Process Modeling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 57, 4007-4018, (doi:10.1021/acs.iecr.8b00477)

Fruhstorfer, J.; Demuth, C.; Goetze, P.; Aneziris, C. G.; Ray, S.; Gross, U.; Trimis, D. (2018): How the coarse fraction influences the microstructure and the effective thermal conductivity of alumina castables – An experimental and numerical study. *Journal of the European Ceramic Society*, 38 (1), 303-312, (doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.07.038)

- Gruber, M.; Wieland, C.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Schollenberger, D.; Bajohr, S.; Morstein, O. von; Schirrmeyer, S. (2018): Modeling and Design of a Catalytic Wall Reactor for the Methanation of Carbon Dioxide. *Chem. Ing. Tech.*, 90 (5), 615-624, (doi:10.1002/cite.201700160)
- Gruber, M.; Weinbrecht, P.; Biffar, L.; Harth, S.; Trimis, D.; Brabandt, J.; Posdziech, O.; Blumentritt, R. (2018): Power-to-Gas through thermal integration of high-temperature steam electrolysis and carbon dioxide methanation – Experimental results. *Fuel Processing Technology*, 181, 61-74, (doi:10.1016/j.fuproc.2018.09.003)
- Montenegro, C. Y. S.; Bensaid, S.; Lorentzou, S.; Vlachos, N.; Pantoleontos, G.; Konstandopoulos, A.; Luneau, M.; Meunier, F. C.; Guilhaume, N.; Schuurman, Y.; Werzner, E.; Herrmann, A.; Rau, F.; Krause, H.; Rezaei, E.; Ortona, A.; Gianella, S.; Khinsky, A.; Antonini, M.; Marchisio, L.; Vilardo, F.; Trimis, D.; Fino, D. (2018): Development of a robust and efficient biogas processor for hydrogen production. Part 2: Experimental campaign. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (1), 161-177, (doi:10.1016/j.ijhydene.2017.10.177)
- Müller, T.; Kadel, K.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Zarzalis, N.; Sängler, A.; Jakobs, T.; Kolb, T. (2018): Influence of Reactor Pressure on the Primary Jet Breakup of High-Viscosity Fuels: Basic Research for Simulation-Assisted Design of Low-Grade Fuel Burner, in Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Oslo, Norway, June 11-15, 2018, GT2018-75950, (doi:10.1115/GT2018-75950)
- Müller, T.; Kadel, K.; Habisreuther, P.; Trimis, D.; Zarzalis, N.; Sängler, A.; Jakobs, T.; Kolb, T. (2018): Simulation of the Primary Jet Breakup of Non-Newtonian Fuels: Basic Research for Simulation-Assisted Design of Low-Grade Fuel Burner, in Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Oslo, Norway, June 11-15, 2018, GT2018-75945, (doi:10.1115/GT2018-75945)
- Rau, F.; Herrmann, A.; Krause, H.; Fino, D.; Trimis, D. (2018): Efficiency of a pilot-plant for the autothermal reforming of biogas. *International Journal of Hydrogen Energy*, (online, in press), (doi:10.1016/j.ijhydene.2018.04.014)
- Sebbar, N.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Bozzelli, J. W.; Bockhorn, H.; Trimis, D. (2018): S<sub>2</sub> + Air Combustion: Reaction Kinetics, Flame Structure and Laminar Flame Behavior. *Energy & Fuels*, 32 (10), 10184-10193, (doi:10.1021/acs.energyfuels.8b01019)
- Vin, N.; Battin-Leclerc, F.; Le, G. H.; Sebbar, N.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Herbinet, O. (2018): A study of chlorobenzene pyrolysis. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37 (1), 399-407 (doi:10.1016/j.proci.2018.05.067)
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H. (2018): Towards reduction of computational cost for large-scale combustion modelling with a multi-regional concept. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 18 (6), 333-346, (doi:10.1504/PCFD.2018.096616)
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Nawroth, H.; Paschereit, C. O. (2018): Impact of Combustion Modeling on the Spectral Response of Heat Release in LES. *Combustion, Science and Technology*, (online, in press), (doi:10.1080/00102202.2018.1558218)
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Denev, J. A.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H. (2018): Automated Code Generation for Maximizing Performance of Detailed Chemistry Calculations in OpenFOAM. In *High Performance Computing in Science and Engineering '17*, Nagel W., Kröner D., Resch M. (ed.), Springer, Cham, p. 189-204, (doi:10.1007/978-3-319-68394-2\_11)
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Häber, T.; Bockhorn, H. (2018): Ignition of combustible mixtures by hot particles at varying relative speeds. *Combustion Science and Technology*, (online, in press), (doi:10.1080/00102202.2018.1435530)
- Habisreuther, P.; Stelzner, B.; Vlavakis, P.; Loukou, A.; Zarzalis, N.; Trimis, D. (2018): Structure transition from oxygen-enhanced to oxy-fuel methane non-premixed flames near extinction. 2<sup>nd</sup> International Workshop on Oxy-Fuel Combustion, Bochum, 14-15. Februar 2018
- Harth, S. (2018): Power-to-SNG mit hohem Wirkungsgrad: Das HELMETH Projekt. Jahrestagung 10 Jahre KIT-Zentrum Energie, Karlsruhe, 26. Juni 2018
- Harth, S.; Gruber, M.; Trimis, D.; Posdziech, O.; Brabandt, J. (2018): Highly efficient Power-to-Gas Process by Integration of High-Temperature Electrolysis and CO<sub>2</sub> Methanation. 13<sup>th</sup> European SOFC & SOE Forum, Luzern, Schweiz, 3.-6. Juli 2018
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J. (2018): Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser im Jahre 2017, Teil 1. *gwf Gas + Energie*, 159 (06), 49-67
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J. (2018): Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser im Jahre 2017, Teil 2. *gwf Gas + Energie*, 159 (07/08), 64-79
- Mätzing, H.; Baumann, W.; Bologa, A.; Loukou, A.; Teuscher, N.; Vlavakis, P.; Gehrman, H.-J.; Paur, H. R.; Trimis, D.; Stapf, D. (2018): Deconvolution of nanoparticle size distributions measured in combustion processes, *International Aerosol Conference (IAC 2018)*, St. Louis, MO, September 2-7, 2018
- Mätzing, H.; Baumann, W.; Bologa, A.; Loukou, A.; Teuscher, N.; Vlavakis, P.; Gehrman, H.-J.; Paur, H. R.; Trimis, D.; Stapf, D. (2018): Deconvolution of nanoparticle size distributions measured in combustion processes, *Aerosol Technology (AT2018)*, Bilbao, Spain, June 18-20, 2018
- Mätzing, H.; Vlavakis, P.; Sentko, M.; Loukou, A.; Stelzner, B.; Trimis, D.; Stapf, D. (2018): Deconvolution of Soot Particle Size Distributions, *Proceedings of Joint Meeting of the German and Italian Sections of the Combustion Institute, Sorrento, Italy, May 23-26, 2018*, (ISBN 978-88-88104-22-5)
- Müller, T.; Goßmann, A.; Kühn, J.; Etzold, M.; Stelzner, B.; Zarzalis, N.; Durst, F.; Trimis, D. (2018): A Low Power Liquid Fueled Burner using a Novel Atomization Concept, *Proceedings of Joint Meeting of the German and Italian Sections of the Combustion Institute, Sorrento, Italy, May 23-26, 2018*, (ISBN 978-88-88104-22-5)
- Sebbar, N.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D. (2018): Investigation of S<sub>2</sub> + Air Combustion, *Proceedings of Joint Meeting of the German and Italian Sections of the Combustion Institute, Sorrento, Italy, May 23-26, 2018*, (ISBN 978-88-88104-22-5)
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Nawroth, H.; Li, N.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D.; Paschereit, C. O. (2018): Spectral Response of Different Combustion Models in LES of Direct Combustion Noise, *Proceedings of Joint Meeting of the German and Italian Sections of the Combustion Institute, Sorrento, Italy, May 23-26, 2018*, (ISBN 978-88-88104-22-5)
- Zhang, F.; Zirwes, T.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.; Trimis, D.; Bockhorn, H. (2018): Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Fan-Stirred Combustion Vessel, *Proceedings of Joint Meeting of the German and Italian Sections of the Combustion Institute, Sorrento, Italy, May 23-26, 2018*, (ISBN 978-88-88104-22-5).

- Zirwes, T.; Zhang, F.; Denev, J. A.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.; Trimis, D. (2018). Optimized Chemistry and Detailed Transport for Massively Parallel Simulations of Turbulent Combustion with OpenFOAM, in Proceedings of 13<sup>th</sup> OpenFOAM Workshop (OFW13), Shanghai, China, June 24-29, 2018.
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Habisreuther, P.; Denev, J. A.; Bockhorn, H. (2018): Automated Code Generation for Maximizing Performance of Detailed Chemistry Calculations in OpenFOAM. InSIDE, Innovatives Supercomputing in Deutschland, 2018
- Zirwes, T.; Zhang, F.; Habisreuther, P.; Denev, J. A.; Bockhorn, H.; Trimis, D. (2018): Optimizing Load Balancing of Reacting Flow Solvers in OpenFOAM for High Performance Computing, Proc. of 6<sup>th</sup> ESI OpenFOAM User Conference, ESI-OpenCFD, p. 1-13, Hamburg, Germany, Oct. 17-19, 2018
- Krause, H.; Werschy, M.; Giese, A.; Leicher, J.; Dörr, H. (2018): Hauptstudie Gasbeschaffenheit - Phase II, DVGW, Bonn, 2018
- Scholten, K. F.; Dörr, H.; Werschy, M. (2018): Mögliche Beeinflussung von Bauteilen der Gasinstallation durch Wasserstoffanteile im Erdgas unter Berücksichtigung der TRGI, DVGW, Bonn, 2018
- Lucke, N.; Schuhmann, E.; Dörr, H. (2018): Smart District: Sektorenkopplung zur effizienten Transformation der Energieversorgung, DVGW, Bonn, 2018

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

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

#### 3.1 Forschung und Lehre

##### **KIT**

Im letzten Jahr wurde der erste Bauabschnitt des neuen Engler-Bunte-Instituts fertiggestellt und eingeweiht. Darin sind auch Laboratorien für das Teilinstitut Wasserchemie und Wassertechnologie realisiert, die wir hauptsächlich für die Durchführung von Studierendenpraktika nutzen (**Bild 3.1**). Qualitativ bedeutet dies für die Ausbildung von Chemie- und BioingenieurInnen eine erhebliche Verbesserung, da die Laboratorien eine zeitgemäße Einrichtung haben. Auch wenn der gesamte Neubau des Engler-Bunte-Instituts sich noch über einen längeren Zeitraum hinzieht, ist es jetzt aber schon möglich, nahezu alle Vorlesungen, Praktika und Seminare im Neubau Gebäude 40.50 durchzuführen.

In den „alten“ Laboratorien der Wasserchemie und Wassertechnologie wurde im letzten Jahr eine große Anzahl von Forschungsprojekten bearbeitet. Ein wichtiges Highlight ist hier die Vermessung der Konzentrationspolarisation oberhalb von Nanofiltrationsmembranen mithilfe der Raman-Mikroskopie. Damit ist es tatsächlich zum ersten Mal gelungen, in einer Membranfließzelle unter realen Betriebsbedingungen das Konzentrationsprofil von Sulfationen in der Nähe der Nanofiltrationsmembran zu bestimmen.

Es besteht jetzt die Chance, den Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit und Spacergeometrie auf die Konzentrationspolarisation nicht nur (wie bisher) durch Modelle vorherzusagen, sondern tatsächlich ortsaufgelöst zu vermessen. Die Methode soll weiterhin eingesetzt werden, um den Einfluss von Biofilmwachstum auf die Konzentrationspolarisation zu ermitteln. In der Theorie wird davon ausgegangen, dass ein Biofilm auf einer Membran die Dicke der Konzentrationsgrenzschicht vergrößert und damit auch den osmotischen Druck durch die abzutrennenden Ionen direkt an der Membranoberflä-

che erhöht. Dies kann nun mit der Raman-Mikroskopie untersucht werden.

Weiterhin ist es sehr erfreulich, dass die Wasserchemie und Wassertechnologie des Engler-Bunte-Instituts einen wesentlichen Beitrag zur Aufklärung der Herkunft von Antibiotikaresistenzgenen im Sediment von Fließgewässern leisten konnte. Hierzu wird im Folgenden noch ausführlicher berichtet.

Die beiden oben genannten Highlights dokumentieren sehr schön den Anspruch des Teilinstituts. Die analytischen Methoden und Kompetenz sind treibende Komponenten für unsere Forschungsarbeiten. Das Interesse ist aber die Prozessaufklärung, sowohl in Reaktoren als auch in natürlichen aquatischen Systemen. Dabei ist neben der Erfassung der Stoffkonzentration auch die Aufklärung der Transportwege von herausragender Bedeutung. Das macht die Stärke des Chemie- und/oder Bioingenieurwesens aus, bei denen der Prozess als eine Kombination aus Stoffumsatz und -transport betrachtet wird, der auch über eine Anzahl mehrerer Schritte laufen kann.

##### **Lehre**

Nach vier bis fünf Jahren mit sehr hohen Anfängerzahlen in den Bachelorprogrammen Chemie- und Bioingenieurwesen sinkt die Zahl der Studierenden im ersten Semester seit dem WS 2017/18. Das gilt generell für vergleichbare Studiengänge in Deutschland. Dagegen ist die Attraktivität des englischsprachigen Masterstudiengangs „Water Science and Engineering“ nach wie vor sehr hoch und dies trotz der vom Land Baden-Württemberg eingeführten Studiengebühren von 3.000,- Euro pro Jahr für ausländische Studierende. Der Masterstudiengang trägt maßgeblich dazu bei, dass die Lehrveranstaltungen der Wasserchemie und Wassertechnologie sehr gut besucht sind, da die meisten Studierenden die Vertiefungsrichtung „Urban water management“ wählen. In diesem Studien-

gang haben im letzten Jahr die ersten Studenten ihre Masterarbeiten abgeschlossen und sind zum Teil als Doktoranden übernommen worden.

### **Internationale Kooperationen in Forschung und Lehre**

Im letzten Jahr waren mehrere Gastwissenschaftler am Engler-Bunte-Institut. Frau M.Sc. *Rana Hatoum* von der Universität Lorraine, Nancy, hat sehr intensiv die Auswirkungen des Schlammalters und der Biomassekonzentration auf den Abbau von ausgewählten pharmazeutischen Wirkstoffen untersucht. Dr. *Yiwen Liu* von der Universität in Sydney ist es gelungen, im Rahmen seines Alexander von Humboldt Stipendiums Ammonium oxidierende Archaeen (AOA) in einem Moving Bed Biofilm Reaktor (MBBR) anzureichern. Spannend ist bei dieser Arbeit in der Tat, welche extrem hohe Affinität die AOA zu ihren Substraten Ammonium und Sauerstoff haben. Dr. *Guihua Xu* von der Chinese Academy of Science in Chongqing war bis April 2018 bei uns und hat in einer theoretischen Arbeit die Sedimentation von Belebtschlammflocken simuliert.

Der ABC Kurs (Advanced Biofilm Course) fand 2018 in Magdeburg unter der Leitung von Dr. *Thomas Neu* statt. In diesem Jahr wird der Kurs dann in Delft sein. Der Biofilm-Kurs der GDCh wurde 2018 in Frankfurt von Prof. *Harald Horn* und Dr. *Michael Wagner* durchgeführt.

### **Promotionen**

Im Jahr 2018 hat ein Doktorand seine Promotion in unserem Institut abgeschlossen. Im Dezember 2018 verteidigte Herr Dipl.-Ing. **Marc Tuczinski** seine Dissertation mit dem Thema „Applikation von keramischen Mikrofiltrationsmembranen in der zweistufigen Biogasproduktion“ (Referent: Prof. Dr. *Harald Horn*; Korreferent: Prof. Dr.-Ing. *Marc Wichern*, Ruhr-Universität Bochum).

Der Einsatz von Membranfiltern zur Feststoffabtrennung bei der Aufbereitung von Wässern hat sich in den letzten 20 Jahren sehr rasant entwickelt. Der Hauptgrund hierfür sind die stark reduzierten Kosten für das Membranmaterial und die parallel einhergehende Verbesserung der Abtrenneigenschaften. So sind inzwischen weltweit aerobe Membranbioreaktoren zur Behandlung von kommunalem Abwasser für einige Millionen Einwohnerwerte installiert. Bei der Aufbereitung von stark feststoffhaltigen oder auch anaeroben Prozesswässern besteht jedoch noch ein erheblicher Bedarf, den Prozess der Stoffabtrennung besser zu verstehen. Bisherige Arbeiten legen nahe, dass der maximal erzielbare Flux an Permeat aus einem anaeroben Prozess  $7 \text{ L/m}^2\text{h}$  nicht übersteigen sollte, da dann mit verstärktem Fouling und final mit dem Versagen der Membran zu rechnen ist.

Die Ausgangslage für die Arbeit von Herrn *Tuczinski* war die Anforderung eines weitestgehend partikelfreien

Feedstroms für einen Hochdruckmethanreaktor. Im Rahmen der Energiewende ist das Ziel, das entstehende Biogas nahezu direkt in das nationale Gasnetz einzuspeisen, da entstehendes Kohlendioxid gelöst in der flüssigen Phase verbleibt. Der Feedstrom sollte aus einer Hydrolysestufe generiert werden, in der bei niedrigen pH-Werten (um 6,0) das organische Substrat (Maissilage) in organische Säuren umgewandelt wird, die im Methanreaktor dann gezielt zu Methan umgesetzt werden.

Herr *Tuczinski* hat eine Hydrolysestufe für Maissilage betrieben und den Ablauf mit verschiedensten Membranmodulen behandelt. Dabei wurden zwei verschiedene Varianten für den Betrieb der Membranen gewählt: cross-flow und dead-end. Unabhängig von der Betriebsweise wurden gleich zu Beginn der Versuche keramische Membranen ausgewählt, die im Hinblick auf die Reinigung mit Chemikalien eine deutlich höhere Toleranz als die kostengünstigeren Polymermembranen aufweisen.

Die Ergebnisse des cross-flow Betriebs mit keramischen Rohrmodulen und einer Porengröße zwischen  $0,2$  und  $0,8 \mu\text{m}$  sind sehr erfreulich. Selbst bei längerem Betrieb über mehrere Wochen bis hin zu drei Monaten können Permeatflüsse deutlich über  $20 \text{ L/m}^2\text{h}$  bei einem Transmembrandruck von  $0,5 \text{ bar}$  realisiert werden. Energetisch ist das sicherlich nicht optimiert. Wichtig ist aber das Ergebnis, dass es kurzfristig nicht zur Verblockung der Membranen kommt. Ein aus praktischer Sicht sehr wichtiges Ergebnis ist die Erkenntnis, dass beim Einsatz von Backwashing ein massives Fouling auf der Permeatseite auftritt. Dies wird schlichtweg mit der Zufuhr von extrem substrathaltigem Spülwasser an die Membran begründet, was zu optimalen Wachstumsbedingungen für die Mikroorganismen führt.

Die dead-end Versuche verliefen nicht so günstig. Zu schnell sind die eingesetzten keramischen Flachmembranen verblockt. Critical-flux Experimente zeigen für den dead-end Betrieb eine Obergrenze von  $7$  bis  $9 \text{ L/m}^2\text{h}$  an, wie sie bereits oben genannt wurde.

Die Arbeit zeigt sehr eindrucksvoll die Auswirkungen der Membranfiltration auf die Methanausbeute in der nachgeschalteten Methanisierung. Dazu wurde die Methanbildung des Feedstroms hin zur Membranfiltration mit der Methanbildung des Permeats unter identischen Bedingungen gemessen. Das Ergebnis ist für einen späteren Betrieb einer großtechnischen Anlage äußerst wichtig, da offensichtlich durch die Filtration kaum schnell abbaubares Substrat verloren geht. Wird ein Teil des Konzentrats aus der Membranfiltration wieder in die Hydrolysestufe zurückgeführt, kann durch geschickte Prozessführung ein Optimum an Methan gewonnen werden. In Zukunft wird das Substrat nicht nur durch den Anaerobreaktor mit Verweilzeiten von mehreren Wochen „hindurchgeschoben“. Es kann gezielt durch eine



**Bild 3.1.:** Neue Laboratorien der Wasserchemie und Wassertechnologie im Neubau Gebäude 40.50 des Engler-Bunte-Instituts

vorgesaltete Hydrolysestufe in ein technisches System (Methandruckreaktor) eingespeist werden, um dort bedarfsgerecht Methan mit einer Aufenthaltszeit des Permeats im Bereich von nur 24 Stunden zu produzieren. Es gibt in diesem Feld keine vergleichbare Arbeit, die das Thema so umfänglich und mit so guten Ergebnissen bearbeitet hat. Die Arbeit ist im Rahmen der Schriftenreihe Bereich Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie, erschienen (Band 75, ISSN: 2195-2973).

### 3.2 In Arbeit befindliche, im Jahre 2018 abgeschlossene\* und neu begonnene Forschungsprojekte

Die 2018 in den Forschungsschwerpunkten Wasserqualität, Wassertechnologie, Biologische Abwasserreinigung und Biologische Grenzflächen bearbeiteten Projekte sind in **Tabelle 3.1** aufgeführt.

Zwei Projekte, die sich zum einen mit **anorganischem Membranfouling** und zum anderen mit der **Herkunft von Antibiotikaresistenzgenen in Vorflutern** beschäftigen, werden im Folgenden ausführlicher vorgestellt:

#### In-Situ Visualisierung und Quantifizierung von anorganischem Fouling bei der Membrandestillation

**Annika Bauer, Florencia Saravia, Michael Wagner, Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, 02WAV1406F)**

Die Membrandestillation (MD) ist ein innovatives membran-basiertes Verfahren zur Aufbereitung verschiedenster Abwässer. Gerade bei der Behandlung von stark salzhaltigen Wässern bietet dieses thermische Verfahren Vorteile gegenüber druckgetriebenen Membrananlagen. Ein Dampfdruckgradient über einer mikroporösen Membran sorgt dabei für die Aufkonzentration der Salze in der Lösung. Durch die hydrophoben Eigenschaften der Membran können ausschließlich volatile Komponenten (z. B. Wasser) durch die Membran permeieren, während nicht-volatile Komponenten (z. B. Ionen) im Feedstrom verbleiben. Mit der MD kann eine theoretische Trennleistung von 100 % erreicht werden. Fouling der Membran gilt jedoch als größte Herausforderung und prozesslimitierender Faktor. Hierbei bilden sich Ablagerungen an der Membranoberfläche oder in den innenliegenden Poren der Membran aus. Fouling verringert die Permeabilität

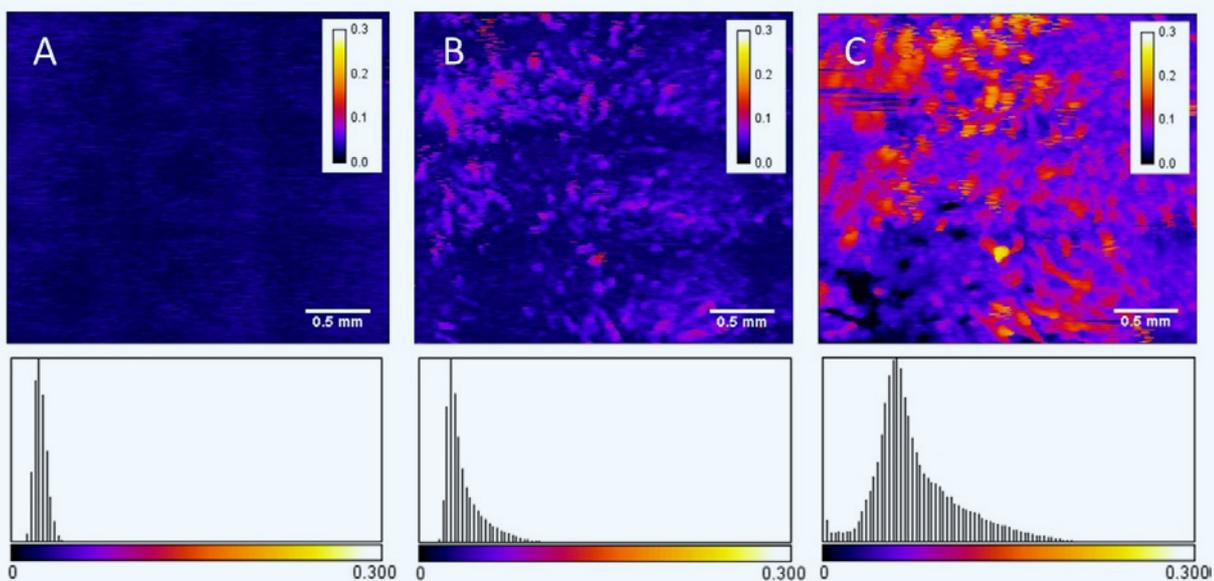
der Membran und verstärkt die Temperaturpolarisation, was in einem Rückgang des Permeat-/Destillat-Fluxes resultiert. Darüber hinaus macht das Fouling die Membran hydrophiler, was das Passieren von flüssigen Komponenten ermöglicht (Wetting). Anorganisches Fouling, das sogenannte Scaling, ist beim Einsatz der MD zu Entsalzungszwecken dominant, jedoch nur wenig untersucht. Dabei kann durch das Wachstum und die Akkumulation von Salzkristallen auf und in der Membran der MD Prozess nahezu komplett zum Erliegen kommen. Die Charakterisierung von Scaling (Verteilung, Struktur) ist daher eine Notwendigkeit, wenn die Scaling-Entwicklung verstanden und reduziert bzw. kontrolliert werden soll. Oft kommt dabei die Rasterelektronenmikroskopie zum Einsatz. Sie bietet zwar hochaufgelöste Aufnahmen, kann jedoch nur ex-situ angewandt werden und macht damit den Ausbau der Membran und die Unterbrechung/den Abbruch des MD-Prozesses notwendig. Entsprechend groß ist der Wunsch nach einer in-situ und nicht invasiven Charakterisierung der Scaling-Entwicklung.

Die optische Kohärenztomographie (OCT) ist ein solches Verfahren, das die online Visualisierung der Membran durch dreidimensionale, hochaufgelöste ( $< 10 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ ) Bild Datensätze in-situ ermöglicht. Mittels OCT können Flächen von mehreren  $10 \text{ mm}^2$  in unter einer Minute gescannt werden. Damit ist eine Visualisierung der Membranoberfläche auch im laufenden Betrieb möglich. Dieses Monitoring er-

möglicht versuchsbegleitend eine Beurteilung der Deckschichtentwicklung und deren Auswirkung auf den Betrieb der MD (**Bild 3.2**). Dafür wurde eine spezielle Methode zur Datensatzanalyse entwickelt, diese kann Scaling sicher detektieren und quantifizieren. Anhand neu definierter Foulingparameter RS und RC (RS = Ratio of scanned membrane area, definiert als Volumen der Foulingschicht pro untersuchter Membranfläche; RC = Ratio of covered membrane area, definiert als Volumen der Foulingschicht pro bedeckter Membranfläche) können Prozessparameter, hier speziell die Verringerung des Permeat-Fluxes und die Ergebnisse der Scalinganalyse mittels OCT korreliert werden. Zudem können anhand der Parameter strukturelle Informationen über die Foulingschicht gewonnen werden.

Die Methode wurde bereits erfolgreich bei der Direct Contact Membrane Distillation (DCMD) von Thermalwasser angewandt und zeigte eine kritische Foulingrate zwischen  $RS = 50\text{-}60 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ , was mit einem Rückgang des Fluxes um 80 % korrelierte. Unter Berücksichtigung der tatsächlich bedeckten Membranfläche in Parameter RC, führt die Bedeckung von ca. 90 % der Membranfläche zu diesem Einbruch des Fluxes und wird als prozesslimitierender Faktor verstanden.

Mit der vorgestellten Methode wird ein membranbasiertes Prozessmonitoring möglich, wodurch eine optimierte Prozessführung im Hinblick auf Reinigungszyklen der Membran realisiert werden kann. Neben dem optimier-



**Bild 3.2.:** Topografische Darstellung der Membranoberfläche bzw. Foulingschicht am Übergang zur Bulkphase (Feed; Thermalwasser). (A) wurde direkt zu Beginn des Experimentes ( $t = 0$ ) aufgenommen. (B) und (C) zeigen bereits die ausgebildete Scaling-/Foulingschicht nach 10 bzw. 30 Tagen. Der Kalibrierbalken entspricht der Höhe der Foulingschicht über der Membran in mm. Das jeweilige Histogramm stellt die Höhenverteilung dar

**Tabelle 3.1.:** In Arbeit befindliche, im Jahre 2018 abgeschlossene\* und neu begonnene Forschungsprojekte

Schwerpunkt	Projektmitarbeiter/ Innen	Thema	Förderung
<b>Wasser- qualität</b>	Alondra Alvarado Stephanie West Gudrun Abbt-Braun	Hydrolyse partikulärer organischer Stoffe bei der anaeroben und aeroben Abwasserbehandlung	National Council on Science and Technology (CONACYT), Mexiko, Dt. Akad. Austauschdienst (DAAD), DVGW
	Philip Brown Ewa Borowska Thomas Schwartz	Vorkommen und Verbreitung von Antibiotika-resistenzgenen in der von Abwasser beeinflussten aquatischen Umwelt	DVGW
	Stephanie Kaschewski	Anwendung neuer Technologien wie das Internet of Things und künstliche Intelligenz zur Verbesserung der Trinkwasserversorgung in Wohngebäuden	BOSCH
	Nico Seeleib Gudrun Abbt-Braun	Nachweis von Harnstoff in sub-ppm Konzentrationen in natürlichen und technischen Wässern	DVGW
	Alexander Timm Ewa Borowska	Sonnenlichtgetriebener Abbau von Antibiotika in der aquatischen Umwelt*	DVGW
	Stephanie West	Weiterentwicklung und Validierung der Durchflussszytometrie als schnelle Detektionsmethode für Bakterien in Roh- und Trinkwasser (FlowDetect; Verbundprojekt)	DVGW
	Stephanie West	Mikroorganismen und Turbulenz – Wasserqualitätsvorhersage (MOAT; Verbundprojekt)	Baden-Württemberg Stiftung
<b>Wasser- technologie</b>	Dámara Araya Valenzuela Florencia Saravia	Fallstudie zur Implementation von Wassertechnologien in ariden Gebieten (HeiKA Verbundprojekt)	National Commission of Scientific and Technological Research (CONICYT), Chile, DAAD
	Annika Bauer Florencia Saravia Michael Wagner	Konzentrate aus der Abwasserwiederverwendung (HighCon; Verbundprojekt)	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
	Oliver Jung Gudrun Abbt-Braun Florencia Saravia	Sustainable Management of Available Water Resources with Innovative Technologies (SMART-MOVE; Verbundprojekt)	BMBF
	Oliver Jung Florencia Saravia Michael Wagner	Raman-Spektroskopie zur Darstellung von Konzentrationspolarisation in NF/RO-Membranverfahren	BMBF, Helmholtz Gemeinschaft (Atmosphäre und Klima, ATMO)
	Rowayda Ali Jinpeng Liu Florencia Saravia	Reactor cascades for the biotechnological conversion of waste into platform chemicals (RECICL; Verbundprojekt)	BMBF
	Michael Sturm	Mikroplastikfreie Meersalzgewinnung – Entwicklung eines methodologischen und technologischen Verfahrens zur Reduktion der Mikroplastikbelastung bei der Meersalzgewinnung	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) – Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)
	Marc Tuczinski Florencia Saravia	Autogenerative Two-Phase High Pressure Fermentation (AG-HiPreFer; Verbundprojekt)*	BMBF
	Stephanie West Andrea Hille-Reichel	Verfahrensentwicklung für den Einsatz der biologischen Methanisierung in der zweistufigen Biogaserzeugung (Verbundprojekt)	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)
<b>Biologische Abwasser- reinigung</b>	Rana Hatoum Ewa Borowska	The effect of the biological reactor configuration on the elimination of micropollutants in wastewater	DVGW, Carnot Institute ICÉEL
<b>Biologische Grenzflächen</b>	Florian Blauert Michael Wagner	Evolution biologischer Systeme durch Technologie am Beispiel von Biofilmen in mikrobiellen Brennstoffzellen (EVOBLISS; Verbundprojekt)*	Europäische Union
	Laure Cuny Andrea Hille-Reichel	Anwendung der Biofilmentechnologie für die biotechnologische Produktion einer Modellsubstanz	KIT, DVGW
	Luisa Gierl Michael Wagner	Nutzung von multidimensionalen Bilddaten der optischen Kohärenztomographie zur Entwicklung eines multiphysikalischen Biofilmmodells	DFG
	Max Hackbarth Andrea Hille-Reichel Michael Wagner	Mikrobielle Elektrosynthese zur Bioplastik Produktion aus Rauchgas (BioElectroPlast; Verbundprojekt)	BMBF
	Florian Ranzinger	Untersuchung poröser Medien mittels Magnetresonanztomographie	KIT

ten Zeitpunkt für Reinigungszyklen kann auch die Effektivität einer Membranreinigung bewertet werden.

### Auswirkung der partikulären Fracht von Kläranlagenabläufen auf die Häufigkeit von Antibiotikaresistenzen im Sediment des Vorfluters

**Philip C. Brown, Ewa Borowska, Thomas Schwartz, Förderung: DVGW**

Aufgrund der nachlassenden Wirksamkeit von Antibiotika sind antibiotikaresistente Krankheitserreger für Mensch und Umwelt von größter Bedeutung. Obwohl dies im klinischen Bereich zunächst ein größeres Problem zu sein scheint, muss die Resistenzentwicklung in der natürlichen Umwelt berücksichtigt werden und in die Risikobewertung einfließen. Denn Antibiotika und die Widerstandsfähigkeit von Bakterien gegen Antibiotika sind prähistorische Erscheinungen, die ihren Ursprung in der natürlichen Umwelt haben. Erst durch das Einwirken des Menschen auf diese wurden sowohl die antibiotikaresistenten Bakterien (ARB) als auch die bereits vorhandenen Antibiotikaresistenzgene (ARG) selektiert, abgewandelt, übertragen und vermehrt.

In diesem Projekt liegt der Fokus auf der Messung von ARG in Kläranlagenabläufen und im Vorfluter, wo autochthone, allochthone und pathogene Organismen zusammentreffen und ihre Gene, darunter ARG, austauschen. Durch die Einleitung von biologisch gereinigtem Abwasser gelangen hier sowohl Antibiotikarückstände als auch ARB kontinuierlich in die aquatische Umwelt. Es wurde gezeigt, dass diese Emissionen auch zu einem Anstieg von ARG in den Vorflutern führen (**Bild 3.3 A**) [1]. Wiederholt wird in diesem Zusammenhang die Rolle von geringen Antibiotikarückständen diskutiert, weil diese unterhalb der minimalen Hemmkonzentration für bakterielles Wachstum (MHK) einen Selektionsdruck auf mikrobielle Populationen ausüben und damit auch die Selektion von ARG bewirken könnten. Allerdings wurden Antibiotika in dieser Studie lediglich im unteren ng/L-Bereich gemessen, in welchem die Selektion durch Antibiotika vernachlässigt werden kann [1]. Die weiteren Ergebnisse weisen auf eine andere Ursache der kontinuierlichen Verbreitung von ARG hin: ARG lagern sich indirekt (über ihre Trägerorganismen) oder direkt (extrazellulär) an die partikulären Bestandteile im Abwasser an und gelangen damit über die Sedimentation in das Sediment der Vorfluter [1]. Dies deutet darauf hin, dass die partikuläre Fracht in biologisch gereinigten Abwässern einen erheblichen Beitrag zum Eintrag von ARBs und ARGs in Oberflächengewässer leistet. In dem hier untersuchten Fall liegt der Anstieg der Häufigkeit von Genkopien relevanter Antibiotikaresistenz-

gene im Sediment nach der Kläranlageneinleitung bei einer Größenordnung. Es kann zudem gezeigt werden, dass der Anstieg direkt mit dem Eintrag korreliert (**Bild 3.3 B**) [1]. Die ARG-Menge, gemessen als Bestandteile der Genome aus Gesamtpopulationen, in der sedimentierbaren Fraktion des Ablaufs (Genkopien pro g Feststoff (Total Suspended Solids [TSS])) korrelierte positiv mit der Änderung der ARG-Menge im Flusssediment des Vorfluters (Differenz der Genkopien pro g Sediment unterhalb und oberhalb der Einleitungsstelle) ( $R^2 = 0,86$ ;  $p < 0,05$ ). Die Ergebnisse stimmen mit einer kürzlich erschienenen Studie überein. Dabei zeigten Karkman et al. (2019), dass das Auftreten von ARG mit fäkaler Belastung und nicht mit Selektion durch Antibiotika einhergeht [2].

Um die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen durch Kläranlageneinleitungen zu verringern, müssten Verfahren zur Abtrennung der partikulären Fracht im gereinigten Abwasser bereitgestellt werden, die über eine Sand- oder Aktivkohlefiltration hinausgehen. Letztere zwei Verfahren zeigten sich als nicht geeignet, zu einer erforderlichen Verringerung von ARB/ARG beizutragen [3]. Eine Reduktion des Eintrags erscheint nur dann möglich, wenn die partikuläre Fracht durch geeignete Filtration abgesenkt wird. In wie weit die Flockungsfiltration einen signifikanten Beitrag leisten kann oder ob Mikro- oder besser Ultrafiltration eingesetzt werden soll, muss letztlich durch detaillierte Versuche geklärt werden.

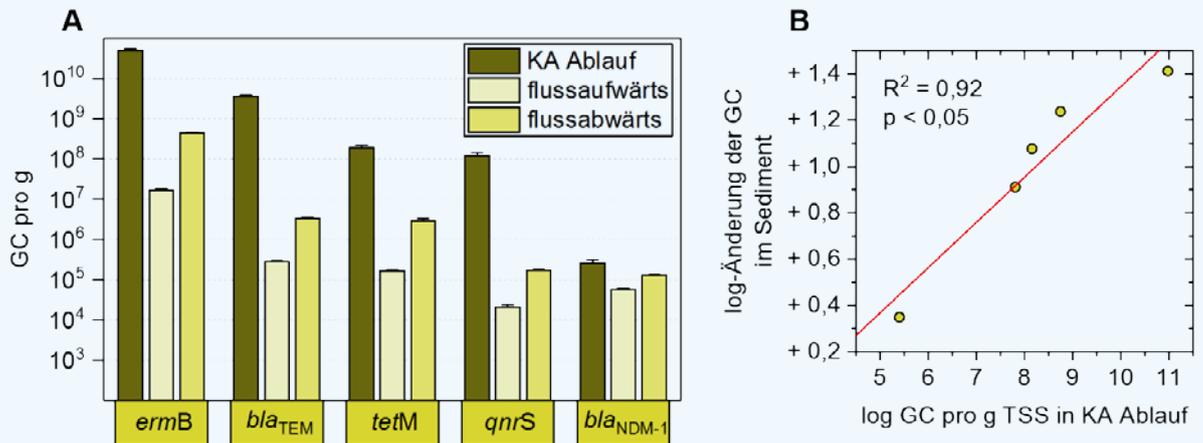
#### Referenzen:

- [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 (2019), p. 1171-1178.
- [2] Karkman, A., Pärnänen, K., Larsson, D.G.J.: Fecal pollution can explain antibiotic resistance gene abundances in anthropogenically impacted environments. *Nature Communications* 10 (2019), Article No. 80.
- [3] Jäger, T., Hembach, N., Elpers, C., Wieland, A., Alexander, J., Hiller, C., Krauter, G., Schwartz, T.: Reduction of antibiotic resistant bacteria during conventional and advanced wastewater treatment, and the disseminated loads released to the environment. *Frontiers in Microbiology* 9 (2018), Article No. 2599.

### 3.3 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen in „peer-reviewed“ Fachjournalen (Auswahl)

- [4] Bär, K., Merkle, W., Tuczinski, M., Saravia, F., Horn, H., Ortloff, F., Graf, F., Lemmer, A., Kolb, T.: Development of an innovative two-stage fermentation process for high-calorific biogas at elevated pressure. *Biomass and Bioenergy* 115 (2018), 186-194.
- [5] Fatoorehchi, E., West, S., Abbt-Braun, G., Horn, H.: The molecular weight distribution of dissolved organic carbon after application of different sludge disintegration techniques.



**Bild 3.3.:** (A) ARG Häufigkeit im Kläranlagenablauf (KA Ablauf) (pro g TSS) und in Sedimenten des Vorfluters (pro g Sediment), oberhalb und unterhalb der Einleitungsstelle. GC = Genkopien. (B) Lineare Regression zwischen der Änderung der ARG im Sediment des Vorfluters (vor und nach Einleitung) und der ARG Häufigkeit in der sedimentierbaren Fraktion des Kläranlagenablaufs. (*bla<sub>TEM</sub>* & *bla<sub>NDM-1</sub>* =  $\beta$ -Laktamasen; *qnrS* = Quinolon-Resistenz; *tetM* = Tetrazyklin-Resistenz, *ermB* = Erythromycin-Resistenz)

Separation and Purification Technology 194 (2018), 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.047>.

[6] Frimmel, F.H., Abbt-Braun, G.: Humic matter: basis for life – a plea for humics care. *Journal of Soils and Sediments* 18 (2018), 2668-2674. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1915-5>.

[7] Guo, X., Theissen, S., Claussen, J., Hildebrand, V., Kamphus, J., Wilhelm, M., Luy, B., Guthausen, G.: Topological insight into superadsorbent hydrogel network structures: a 1H double-quantum NMR study. *Macromolecular Chemistry and Physics* 219 (2018) No. 13.

[8] Jeihanipour, A., Shen, J., Abbt-Braun, G., Huber, S.A., Mkongo, G., Schäfer, A.I.: Seasonal variation of organic matter characteristics and fluoride concentration in the Maji ya Chai River (Tanzania): Impact on treatability by nanofiltration/reverse osmosis. *Science of the Total Environment* 637-638 (2018), 1209-1220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.113>.

[9] Katz, S., Wagner, M., Horn, H., Tarchitzky, J., Chen, Y.: Size and stability of suspended aggregates in municipal effluents containing montmorillonite, bacteria and fulvic acid. *Irrigation Science* 36 (2018) No. 4-5, 203-216.

[10] Kespe, M., Förster, E., Nirschl, H., Guthausen, G.: Flowing liquids in NMR: Numerical CFD simulation and experimental confirmation of magnetization buildup. *Applied Magnetic Resonance* 49 (2018) No. 7, 687-705.

[11] Kilerich, B., Wagner, M., Nielsen, A.H., Vollertsen, J.: Apparent diffusion coefficients in sewer force main biofilms treated with iron salts. *Environmental Science: Water Research & Technology* 4 (2018) No. 10, 1501-1510.

[12] Laryea, E., Schuhardt, N., Guthausen, G., Oerther, T., Kind, M.: Construction of a temperature controlled Rheo-NMR measuring cell – Influence of fluid dynamics on PMMA-polymerization kinetics. *Microporous and Mesoporous Materials* 269 (2018), 65-70.

[13] Li, C., Brunner, F., Wagner, M., Lackner, S., Horn, H.: Quantification of particulate matter attached to the bulk-biofilm interface and its influence on local mass transfer. *Separation and Purification Technology* 197 (2018), 86-94.

[14] Linke, C., Guthausen, G., Flöter, E., Drusch, S.: Solid fat content determination of dispersed lipids by time-domain NMR. *European Journal of Lipid Science and Technology* 120 (2018), No. 4, Article No. 1700132.

[15] Liu, Y., Li, C., Lackner, S., Wagner, M., Horn, H.: The role of interactions of effective biofilm surface area and mass transfer in nitrogen removal efficiency of an integrated fixed-film activated sludge system. *Chemical Engineering Journal* 350 (2018), 992-999.

[16] Picioleanu, C., Blauert, F., Horn, H., Wagner, M.: Determination of mechanical properties of biofilms by modelling the deformation measured using optical coherence tomography. *Water Research* 145 (2018), 588-598.

[17] Rüntzsch, V., Haas, M., Özen, M.B., Rätzsch, K.-F., Riazi, K., Kauffmann-Weiss, S., Palacios, J.K., Müller, A.J., Victorias, I., Guthausen, G., Wilhelm, M.: Polymer crystallinity and crystallization kinetics via benchtop 1H NMR relaxometry: Revisited method, data analysis, and experiments on common polymers. *Polymer* 145 (2018), 162-173.

[18] Rosenthal, A.F., Griffin, J.S., Wagner, M., Packman, A.I., Balogun, O., George, F.W.: Morphological analysis of pore size and connectivity in a thick mixed-culture biofilm. *Biotechnology and Bioengineering* 115 (2018) No. 9, 2268-2279.

[19] Schmidt, A., Sturm, G., Lapp, C.J., Siebert, D., Saravia, F., Horn, H., Ravi, P.P., Lemmer, A., Gescher, J.: Development of a production chain from vegetable biowaste to platform chemicals. *Microbial Cell Factories* 17 (2018) No. 1, 90.

[20] Schork, H., Schuhmann, S., Arndt, F., Schütz, S., Guthausen, G., Nirschl, H.: MRI investigations of filtration: Fouling and cleaning processes. *Microporous and Mesoporous Materials* 269 (2018), 60-64.

[21] Schuhmann, S., Schork, N., Beller, K., Nirschl, H., Oerther, T., Guthausen, G.: In-situ characterization of deposits in ceramic hollow

fiber membranes by compressed sensing RARE-MRI. *AIChE Journal* 64 (2018) No. 11, 4039-4046.

- [22] *Tuczinski, M., Saravia, F., Horn, H.*: Treatment of thermophilic hydrolysis reactor effluent with ceramic microfiltration membranes. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 41 (2018) No. 11, 1561-1571.
- [23] *Vargas, M.A., Scheubner, M., Guthausen, G.*: Reaction kinetics of polyfurfuryl alcohol bioresin and nanoparticles by <sup>1</sup>H-NMR

transverse relaxation measurements. *Polymer Composites* 39 (2018) No. 9, 3280-3288.

#### Weitere Informationen:

<http://wasserchemie.ebi.kit.edu>.

## 4. TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

Josef Klinger

Wasser ist eine der wichtigsten Lebensgrundlagen der Erde. Das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser geht diesem besonderen Stoff auf den Grund. Dabei stehen der nachhaltige Schutz der Wasserressourcen und innovative Lösungen für die Trinkwasserversorgung im Mittelpunkt der täglichen Arbeit.

Das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser ist eine gemeinnützige Einrichtung des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs (DVGW). Das TZW widmet sich den technisch-wissenschaftlichen Fragestellungen des gesamten Wasserkreislaufs mit besonderem Fokus auf Trinkwasser. Kernaufgaben sind praxisnahe Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, deren Ergebnisse direkt zur Anwendung kommen oder mit denen zukünftige Themenfelder sowie das DVGW-Regelwerk vorbereitet und umgesetzt werden. Darüber hinaus ist das TZW auch Ansprechpartner für Behörden, Ministerien und Verbände in allen Fragen der Gewässergüte, Trinkwasserqualität und Wassertechnologie. Es fungiert als Bindeglied zwischen DVGW, Universitäten und Wasserversorgungsunternehmen.

Rund 200 hochqualifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus den Fachbereichen Chemie, Biologie, Physik, Umweltwissenschaften, Verfahrenstechnik und Materialwissenschaft arbeiten in der anwendungsnahen Forschung sowie der wissenschaftlichen Beratung. Seit seiner Gründung im Jahr 1991 hat sich das Technologiezentrum Wasser zu einer national und international anerkannten Plattform für den vertieften Austausch zum Thema Wasser entwickelt. Das jährliche Budget von rund 19 Mio. Euro setzt sich vor allem aus Forschungsförderung, praxisnahen Forschungsaufträgen sowie technisch-wissenschaftlichen Studien zusammen.

Der Jahresbericht gibt einen Überblick über die wesentlichen Arbeitsschwerpunkte im Jahr 2018.

### Analytik und Wasserbeschaffenheit

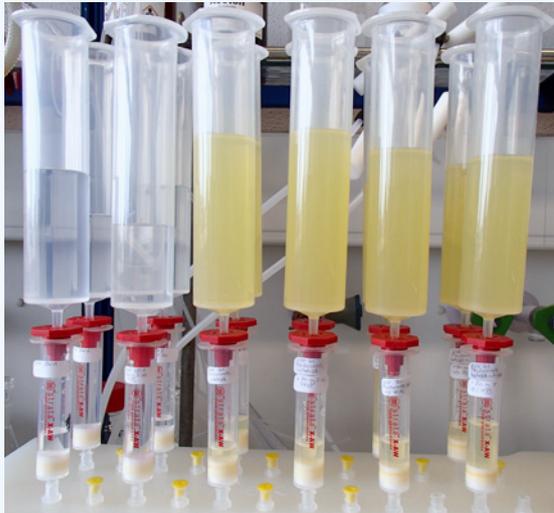
Im Auftrag von Wasserversorgern, Behörden, Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Institutionen analysierte die Fachabteilung für Analytik im Jahr 2018 mehr als 20.000 Proben auf eine Vielzahl von Parametern. Neben den Untersuchungen gemäß Trinkwasserord-

nung bestand weiterhin großes Interesse an der Untersuchung auf organische Spurenstoffe, wobei sowohl klassische Stoffklassen wie Pflanzenschutzmittel und deren Metabolite, Arzneimittelrückstände oder perfluorierte Verbindungen als auch „neue“ Stoffe wie Trifluoressigsäure, Amidosulfonat oder 1H-1,2,4-Triazol durch Wasserversorger und Behörden nachgefragt wurden. Die Leistungsfähigkeit und die hohe Qualität der analytischen Arbeiten wurden auch im Jahr 2018 durch interne und externe Audits sowie durch erfolgreiche Teilnahmen an Ringversuchen und Vergleichsuntersuchungen bestätigt.

Auch die Forschungsaktivitäten der Abteilung wurden im Jahr 2018 ausgeweitet. Im Rahmen eines durch die Bundesländer geförderten und durch das Umweltbundesamt koordinierten Monitoring-Vorhabens werden eine Vielzahl an Abwasserproben aus 49 kommunalen Kläranlagen in Deutschland chemisch-analytisch untersucht. Sie werden auf 38 prioritäre Stoffe und eine Reihe von Begleitparametern analysiert. Insgesamt handelt es sich in diesem Projekt um mehr als 1.000 Proben aus den Abläufen kommunaler Kläranlagen. Ziel des Projektes ist es, Aussagen zum Eintrag von prioritären Stoffen in die Gewässer zu erhalten.

Von hoher Relevanz war die Weiterentwicklung des analytischen Instrumentariums zur genaueren Charakterisierung der Belastung von Wasser-, Boden- und Pflanzenproben mit per- und polyfluorierten Verbindungen. Die zur Verfügung stehende Einzelstoffanalytik wurde deutlich ausgeweitet. Organofluor-Summenparameter wie der EOF (extrahierbares organisch gebundenes Fluor) oder der TOP-Assay wurden methodisch weiterentwickelt und stehen nun für eine Reihe unterschiedlicher Matrices bereit (**Bild 4.1**).

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt lag im Jahr 2018 auf den organischen Phosphonaten. Sie besitzen eine breite Anwendung als Enthärtungsmittel u. a. in Waschmitteln und bei industriellen Prozessen. Aufgrund der anspruchsvollen Phosphonatanalytik waren bislang nur wenige Daten zum Eintrag und zum Umweltvorkommen publiziert. Zur Verbesserung der Datenbasis beteiligte sich das TZW an einem vom Umweltbundesamt geförderten For-



**Bild 4.1:** Aufreinigung von Maismehl-Extrakten zur nachfolgenden Analyse auf extrahierbares organisch gebundenes Fluor (EOF)

schungsvorhaben, in dem eine leistungsstarke neue Kopplungsmethode entwickelt wurde. Durch die neu entwickelten Analysemethoden ist es nun erstmals möglich, das Verhalten und den Verbleib von Phosphonaten weiter aufzuklären. Durch die Anschaffung von zwei Raman-Mikrospektrometern konnten die Voraussetzungen für die erfolgreiche Bearbeitung zweier BMBF-Projekte geschaffen werden, die sich mit dem Vorkommen und dem Verhalten von Mikroplastikpartikeln in der Umwelt befassen. Die entwickelten Analyseverfahren stehen zwischenzeitlich auch für die Routine zur Verfügung, sodass entsprechende Untersuchungen auch für Wasserversorger angeboten werden können.

Als Konsequenz aus dem immer weiter gefassten Aufgabenspektrum der Abteilung wurde zum 1. September 2018 der Forschungsbereich ausgegliedert und die neue Abteilung Wasserchemische Forschung gegründet.

#### Technologie und Wirtschaftlichkeit

Fachlich fundierte und praxistaugliche Lösungen für die Trinkwasseraufbereitung zu erarbeiten, war auch im Jahr 2018 der Arbeitsschwerpunkt der Abteilung Technologie und Wirtschaftlichkeit. In enger Abstimmung mit den Wasserversorgungsunternehmen wurden maßgeschneiderte Versorgungs- und Aufbereitungskonzepte erstellt, einzelne Aufbereitungsstufen in Wasserwerken auf ihre Leistungsfähigkeit geprüft und optimiert sowie neue Aufbereitungstechnologien getestet und implementiert. So wurde für ein Wasserversorgungsunternehmen ein Strukturgutachten mit einem umfassenden Versorgungskonzept erstellt, mit dem langfristig eine hohe Trinkwasserqualität für eine mittelgroße Stadt sicherge-

stellt werden kann. In Zusammenarbeit mit dem lokalen Wasserversorger erfolgten eine Analyse der bestehenden Versorgungsstruktur sowie eine Begutachtung der wesentlichen Betriebspunkte. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Situationsanalyse und den Vorgaben des gültigen Regelwerks wurden anschließend potentiell geeignete Versorgungsvarianten erarbeitet und vergleichend bewertet.

In ähnlicher Weise wurde gemeinsam mit einem Wasserversorger ein Konzept für eine zukunftsorientierte Trinkwasserversorgung mit Wasser aus dem Bodensee entwickelt. Das Konzept garantiert eine sichere Trinkwasserversorgung und trägt den vielfältigen Anforderungen Rechnung, die mit bereits beobachtbaren bzw. den zukünftig zu erwartenden Rahmenbedingungen wie Klimawandel, Extremereignisse, Veränderung der Wasserbeschaffenheit und Vorkommen von Neozoen verbunden sind. Aufbereitungstechnische Ansätze, die sich aus dem Konzept ergeben haben, werden derzeit in Versuchsanlagen am Bodensee auf ihre praktische Umsetzbarkeit geprüft.

Über die Erstellung von Versorgungskonzepten hinaus wurden zahlreiche aufbereitungstechnische Fragestellungen zu klassischen Themen wie Enthärtung, Enteisenung und Entmanganung oder Flockung, aber auch zur Entfernung von organischen Spurenstoffen bearbeitet. Beispielsweise wurden Versuche zur Entfernung von Oxipurinol (Metabolit von Allopurinol, einem Arzneistoff zur Behandlung der chronischen Gicht) mittels Aktivkohle durchgeführt. Nach den Untersuchungen zum Durchbruchverhalten von Oxipurinol an verschiedenen Aktivkohleprodukten in einem GCS-Teststand (GCS: Granular Carbon Selection) ist Oxipurinol sehr gut an Aktivkohle adsorbierbar und somit nicht trinkwasserrelevant (**Bild 4.2**). Durch die Versuche konnte die optimale Kohle für die Entfernung von Oxipurinol unter den gegebenen Randbedingungen ermittelt werden.

Neben den Rückständen von Arzneimitteln und Pestiziden war die Entfernung von per- und polyfluorierten Chemikalien (PFAS) wiederholt ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten. Beispielsweise wurde eine umfassende Literaturrecherche zur Sanierung von mit PFAS kontaminierten Löschwässern oder von im Rahmen von Löscheinsätzen kontaminierten Grundwässern durchgeführt. Insgesamt wurden 15 technische Verfahren beschrieben und anhand ihrer Leistungsfähigkeit unter verschiedenen Randbedingungen und ihrer Kosten verglichen.

Im Jahr 2018 wurden zwei Forschungsvorhaben erfolgreich abgeschlossen. In einem durch den DVGW geförderten Projekt erfolgte eine Bestandsaufnahme zum Auftreten von Algen im Wirkungsbereich von UV-Anlagen. Durch eine systematische Auswertung der Daten wurde versucht, die wesentlichen Einflussfaktoren für ein Algenwachstum zu identifizieren. Ein zweites Forschungs-



**Bild 4.2:** GCS-Teststand zum Vergleich verschiedener Aktivkohlen zur Spurenstoffentfernung

projekt, das durch den Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG finanziert und gemeinsam mit der bnNETZE GmbH in Freiburg bearbeitet wurde, befasste sich mit der Aufklärung der Quellen und Eintragspfade für Chromat im Rohwasser von Trinkwasserversorgern im Oberrheingraben. Das vom BMBF geförderte Verbundforschungsprojekt mit dem Namen CoAct hat im Jahr 2018 begonnen. Hierbei sollen im Raum Friedrichshafen Laub und andere Rest-Biomassen gesammelt und in Aktivkohle umgewandelt werden. Hierdurch wird ein fossiler Rohstoff durch erneuerbare Substanzen ersetzt, wodurch die Abwasserreinigung und die Trinkwasseraufbereitung nachhaltiger gemacht werden. Die Abteilung Technologie und Wirtschaftlichkeit charakterisiert die neuen Materialien und bewertet sie im Vergleich zu handelsüblichen Aktivkohlen.

#### Grundwasser und Boden

Umfassende Datenbanken zur Wasserbeschaffenheit zu betreiben und die Daten auszuwerten und bereitzustellen, war auch im Jahr 2018 für die Abteilung wesentliche Kernaufgabe. Die Grundwasserdatenbank Wasserversorgung Baden-Württemberg erfasst landesweit die Beschaf-

fenheitsdaten der Grund- und Quellwasservorkommen, die von den baden-württembergischen Wasserversorgungsunternehmen zur Trinkwasserversorgung genutzt werden. Die in der Datenbank erfassten Daten wurden fortlaufend aktualisiert und an die einzelnen Landratsämter, Regierungspräsidien und die LUBW exportiert. Die vom TZW aufgebaute und am TZW angesiedelte bundesweite Rohwasserdatenbank Pflanzenschutzmittel Wasserversorgung wurde ebenso betrieben und wissenschaftlich geleitet. Die Datenbank gibt einen bundesweiten Überblick über die tatsächliche Belastungssituation im Rohwasser.

Die Durchführung, Auswertung und wissenschaftliche Bewertung problem- und gebietsspezifischer Grundwasseruntersuchungsprogramme und Ortsbegehungen, etwa bei Belastungen des Grundwassers mit Nitrat, Arzneimittelwirkstoffen, PFAS, Pflanzenschutzmittelwirkstoffen und deren Abbauprodukten sowie Bodenuntersuchungen zur Abschätzung von Nitratauswaschungsverlusten hatten zum Ziel, Handlungsempfehlungen zur Ursachenseitigung von Grundwasserverunreinigungen oder zum Umgang mit Belastungen abzuleiten. Hierbei wurden die Strömungsverhältnisse in zwei- und dreidimensio-



**Bild 4.3:** Ortsbegehung im Einzugsgebiet

nen Modellen von Grundwasserkörpern analysiert und im Zusammenhang mit den Messdaten ausgewertet. In mehreren Fällen wurden gemeinsam mit dem jeweiligen Wasserversorger prozessbasierte Risikomanagementsysteme gemäß DIN EN 15975-2 erarbeitet und umgesetzt. Dabei kam auch ein neuer, am TZW entwickelter GIS-basierter Ansatz zur Risikoabschätzung für Einzugsgebiete von Trinkwassertalsperren zum Einsatz. Damit unterstützte das TZW einen großen Talsperrenbetreiber, ein entsprechendes Risikomanagementsystem bei einer zweiten Talsperre aufzubauen und einzuführen (**Bild 4.3**).

#### Mikrobiologie und Molekularbiologie

Die Schwerpunkte lagen im Jahr 2018 auf folgenden Gebieten: Entwicklung schneller Methoden für Monitoring und Identifizierung von Bakterien, Nachweis von Antibiotikaresistenzen, Behandlung von Kläranlagenabläufen für die Wasserwiederverwendung, mikrobiologischer Abbau von Schadstoffen sowie internationale Kooperationen. Darüber hinaus lag ein weiterer Schwerpunkt auf der Unterstützung von Wasserversorgern, die Ursachen hygienisch-mikrobiologischer Probleme bei der Wassergewinnung, im Wasserwerk, in Behältern oder im Leitungsnetz

zu finden. Mit MALDI-TOF-MS steht am TZW eine zukunftssträngige Methodik zur Identifizierung von Bakterien zur Verfügung, die es ermöglicht, sehr schnell Ergebnisse zu erlangen (**Bild 4.4**). In einigen Fällen gelang es durch die rasche 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 für die Suche der Belastungsursache hilfreich.

Die Durchflussszytometrie wird unter Federführung des TZW im Verbund der DVGW-Forschungseinrichtungen (IWW, DVGW-Forschungsstellen an EBI und TUHH) weiterentwickelt. Diese neue Methode mit Potential für ein Online-Monitoring wurde in Ringversuchen validiert. Zusätzlich zur Bestimmung der Gesamtzellzahl wird die Lebend-Tot-Unterscheidung nach Desinfektion untersucht. Zur Bewertung der mikrobiologischen Rohwasserbeschaffenheit wurden Rohwasserproben zusätzlich zu den klassischen bakteriologischen Parametern auf virale Indikatoren (Bakteriophagen) und die sogenannten Index-Pathogene *Campylobacter*, Viren und Parasiten un-

tersucht. Des Weiteren wurden auch die Betreiber von Trinkwasserinstallationen – insbesondere Kliniken – unterstützt, bei denen mikrobiologische Probleme auftraten. Diese umfassten Nachweise der fakultativen Krankheitserreger *Pseudomonas aeruginosa* und Legionellen. Durch das Erstellen systematischer Beprobungspläne und die Prüfung der Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik konnten die Probleme lokalisiert und Abhilfemaßnahmen geschaffen werden.

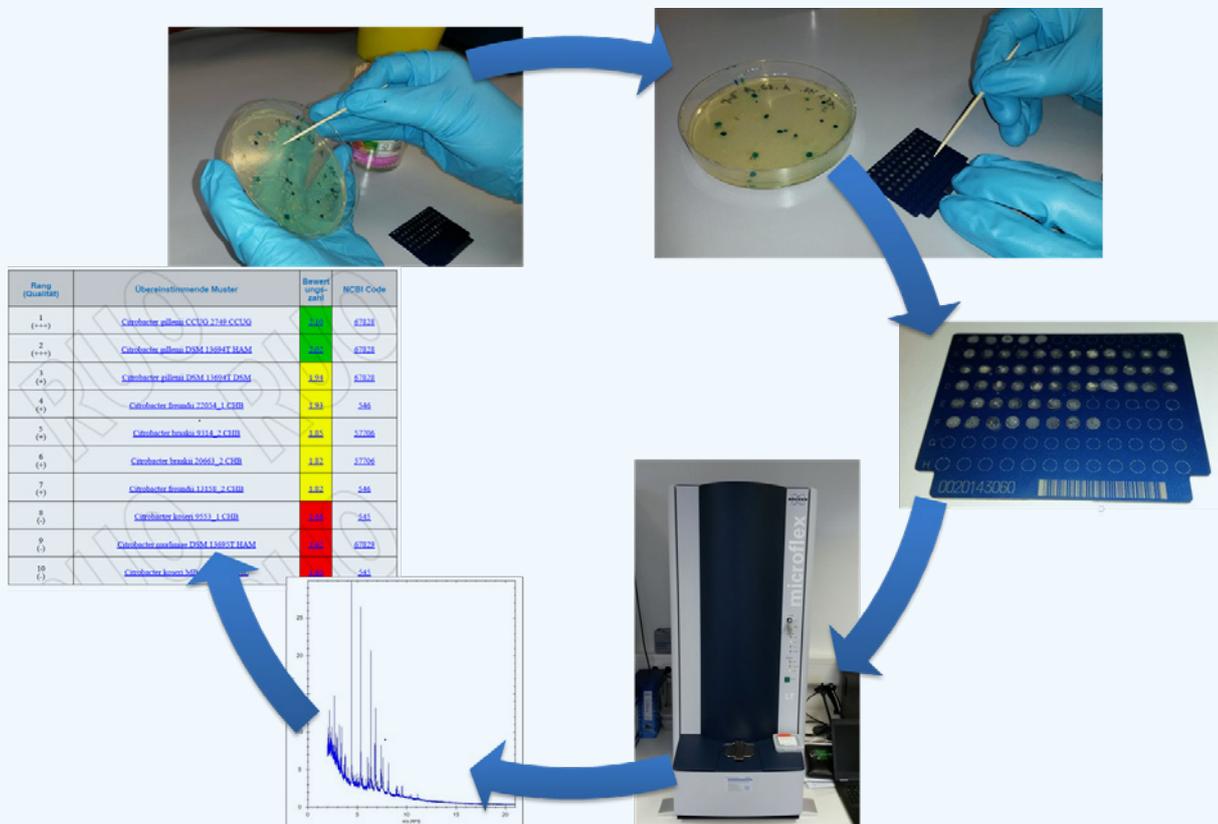
Das Vorkommen von Antibiotikaresistenzen wurde in Kläranlagen, Oberflächengewässern, Grundwasser und Rohwasser für die Trinkwasseraufbereitung erfasst. Dazu wurden angepasste Kulturverfahren und PCR-Methoden eingesetzt. MALDI-TOF-MS diente zur Identifizierung von resistenten ESBL-Stämmen und Vancomycin-resistenten Enterokokken. Bei den Resistenzgenen konnte im Rahmen des BMBF-Projektes HyReKA eine erste Klassifizierung auf Basis der Nachweishäufigkeit vorgenommen werden. Antibiotikaresistenzen wurden auch im Rahmen der Behandlung von Kläranlagen-Ablauf für die Wasserwiederverwendung betrachtet.

Der mikrobiologische Abbau von Schadstoffen in Grundwasser und Boden war weiterhin ein Schwerpunkt bei

Forschungskooperationen. Der Abbau von Trioxan konnte in ungesättigten und gesättigten Säulenversuchen demonstriert werden. Weitere Projekte befassen sich mit der Denitrifikation in Grundwasser und Oberflächenwasser, dem natürlichen Abbau von Teeröl-Schadstoffen (Natural Attenuation) und chlorierten Substanzen sowie der Stimulation des aeroben Abbaus von Trichlorethen. Internationale Kooperationsprojekte wurden innerhalb der EU sowie mit China, Australien, Peru und Vietnam fortgeführt oder begonnen.

#### Korrosion

Die wissenschaftlich-technische Kooperation mit Wasserversorgungsunternehmen war auch im Jahr 2018 wesentliches Standbein dieser Abteilung. Ein häufig nachgefragtes Thema war die theoretische Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeiten für die in Trinkwasserverteilungssystemen relevanten Materialien nach dem einschlägigen Normenwerk im Vorfeld von geplanten Änderungen der Trinkwasserbezugsquellen bzw. sonstigen Änderungen der verteilten Wasserqualität. So war beispielsweise in einem Fall zu klären, inwieweit die Einstellung einer zentralen Phosphatdosierung eine erhöhte Korrosionswahr-



**Bild 4.4:** Vorgehensweise der Identifizierung von Bakterienisolaten mit MALDI-TOF-MS



**Bild 4.5:** Innenansicht einer untersuchten Versorgungsleitung (DN 800)

scheinlichkeit für die unterschiedlichen Werkstoffe in den Trinkwasserinstallationen nach sich ziehen könnte.

Darüber hinaus waren die Begleitung einiger Sanierungsobjekte und die Zustandsbewertung von Versorgungsleitungen bei Versorgungsunternehmen von Interesse (**Bild 4.5**). Hierbei ging es um die Notwendigkeit von Sanierungen oder die Auswahl der geeignetsten Sanierungsstrategie. Im Bereich der Wasserspeicherung wurde beispielsweise ein epoxidharzbeschichteter Behälter untersucht, um festzustellen, ob von der vor Ort festgestellten Kreidung, d. h. einem oberflächigen Materialabtrag an der neu applizierten Beschichtung, eine Gefährdung für das Trinkwasser ausgeht.

Die Problematik von blockierten mechanischen Wasserzählern war auch im Jahr 2018 aktuell. Die durchgeführten Untersuchungen an mehreren Zählern haben gezeigt, dass die Zahnräder der Zählwerke durch kleine Calcit-Kristalle blockiert werden. Die Ursachenforschung dieses Phänomens wurde im Jahr 2017 begonnen und im Berichtszeitraum fortgeführt. Da eine Reihe von Wasserversorgern von dieser Problematik betroffen ist, wurde die Thematik als so relevant eingestuft, dass der DVGW zu einer Informationsveranstaltung geladen hat, um Erfahrungen diesbezüglich auszutauschen. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Untersuchung und Bewertung

von Schadensfällen an Leitungen und Bauteilen in Trinkwasserinstallationen.

#### Prüfstelle Wasser

Die wissenschaftlich-technischen Aufträge haben sich 2018 unterschiedlich entwickelt. So war beispielsweise die Anzahl der hygienischen Prüfungen von Produkten und Werkstoffen im Kontakt mit Trinkwasser nach den KTW-Leitlinien des Umweltbundesamtes etwas rückläufig. Ein Grund für die zurückhaltende Nachfrage nach KTW-Prüfungen mag darin liegen, dass die aktuellen Leitlinien des Umweltbundesamtes für Kunststoffe, organische Beschichtungen und Schmierstoffe im dritten Quartal 2018 offiziell zur Notifizierung unter der Nummer 2018/480/D bei der Europäischen Kommission eingereicht wurden. Mit Annahme der Notifizierung werden dann die Leitlinien in Bewertungsgrundlagen überführt. Gemäß der aktuellen Trinkwasserverordnung erhalten die darin formulierten Anforderungen nach einer Übergangszeit von zwei Jahren gesetzlich verbindlichen Charakter. Dies kann gerade im dritten und vierten Quartal 2018 die abwartende Haltung der Hersteller bedingt haben. Hierbei blieb allerdings der Umfang der Vorprüfung und Bewertung von Rezepturen von Materialien und Werkstoffen nahezu unverändert. Gleiches gilt auch für die Untersu-



**Bild 4.6:** Messung von UV-Lampen in Testreaktoren

chungen zur Vermehrung des mikrobiologischen Bewuchses von organischen Materialien nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 270 bzw. der DIN EN 16421, welche ebenfalls weiterhin von vielen Kunden nachgefragt wurden.

Eine gegenüber dem Vorjahr deutliche Mehrauslastung war im Bereich der UV-Prüfungen gegeben. Um diesem Trend nachzukommen, wurde ein zusätzlicher Prüfstand zur Durchführung von mikrobiologischen Wirksamkeitsprüfungen an UV-Geräten eingerichtet. Damit können nun auch am Standort Karlsruhe UV-Geräteprüfungen bis zu maximalen Durchflüssen von 25 m<sup>3</sup>/h realisiert werden. Ebenso zeigt der Aufbau der Kompetenz in der Qualifizierung von UV-Sensoren und UV-Strahlern, der in den letzten Jahren konsequent weiter vorangetrieben wurde, deutlich positive Effekte. Gerade auf diesem Gebiet laufen weiterhin umfangreiche Forschungsarbeiten, die sich u. a. mit neuen Strahlungsquellen und hier insbesondere der UV-LED-Technik beschäftigen (**Bild 4.6**).

Dem allgemeinen gesellschaftlichen Trend der Trinkwassernachbehandlung Rechnung tragend, war die Nachfrage nach Prüfungen von Enthärtungsanlagen auf einem weiterhin hohen Niveau. Die Prüfungen von Kalkschutzgeräten waren hingegen deutlich rückläufig. Erfreulich entwickelt haben sich die Tätigkeiten und Prüfungen im Rahmen der

Absicherung von Geräten, hierzu zählen beispielsweise die Überprüfung des freien Auslaufs sowie die Prüfung von Filtern in der Hausinstallation und ausgewählten Armaturen in der Wasserverwendung und Wasserverteilung.

Um die neuesten Entwicklungen auf nationaler und internationaler Ebene mitzugestalten, waren die Mitarbeiter auch im Jahr 2018 in vielen nationalen und europäischen Normungsgremien maßgeblich an der Erstellung von Produktnormen beteiligt. Beispielhaft sei die Normungsgruppe des CEN Trinkwasserbehandlungsgeräte erwähnt, deren Vorsitz vom TZW seit vielen Jahren gestellt wird. Das nationale DIN/DVGW-Spiegelgremium hat mit seinen Arbeitsgruppen 2018 mehrere Besprechungen am TZW abgehalten, um aktuelle Normen zu überarbeiten und neue auf den Weg zu bringen.

Darüber hinaus ist die Prüfstelle Wasser auch intensiv in der Produktkontrolle bei Herstellern im In- und Ausland eingebunden und übernimmt dort die Aufgaben der Überwachungsprüfungen als unabhängige Stelle. Diese Arbeiten werden insbesondere im Zuge der DVGW-Zertifizierung von wasserfachlichen Produkten durchgeführt. Neben den europäischen Ländern spielt dabei der asiatische Raum eine zunehmende Rolle.



**Bild 4.7:** Begehung verschiedener Uferfiltrationsstandorte in Nordindien

Im Jahr 2018 wurden die Laborräume der Prüfstelle Wasser am Standort Wasserwerk Durlacher Wald kernsaniert. Dazu wurde die gesamte Einrichtung und Installation entsorgt und komplett neu aufgebaut. Hierbei kam ein neues Konzept zum Tragen, das erlaubt, alle Medien über die Decke zu führen, um größtmögliche Flexibilität zu garantieren. Ebenso wurden bei der räumlichen Gestaltung den besonderen Anforderungen der Prüfpraxis bei Geruchs- und Geschmacksprüfungen Rechnung getragen.

#### Außenstelle Dresden (Verteilungsnetze)

Hier wurden im Jahr 2018 die vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben „Sichere und nachhaltige Trinkwassergewinnung in Indien durch Kopplung von naturnahen und innovativen Verfahren“ sowie „Innovative Sensoren und praxisnahe Untersuchungen“ im Rahmen des Verbundprojektes „Innovative, sichere Sensornetzwerke und modellgestützte Bewertungs- und Analysetools zur Erhöhung der Resilienz von Trinkwasserinfrastrukturen“ erfolgreich abgeschlossen. Dafür wurden mehrere Forschungsprojekte neu begonnen. Dazu zählen beispielsweise die vom DVGW geförderten Vorhaben „Massenentwicklung coliformer Bakterien in Talsperren – Ursachenanalyse und Konsequenzen für die Trinkwasserversorgung“ und „Untersuchungen zur Entwicklung von Spitzenverbrauch und Spitzenfaktoren“. Der Schwerpunkt der Arbeiten für Was-

serversorgungsunternehmen lag auch im Jahr 2018 auf der Erarbeitung von zustandsorientierten Spülplänen. Darüber hinaus war das Jahr 2018 dadurch gekennzeichnet, dass in größerem Umfang Untersuchungen zur Aufklärung der Ursachen für mikrobiologische Gütebeeinträchtigungen in Aufbereitungsanlagen und Wasserverteilungssystemen, insbesondere durch coliforme Bakterien, durchgeführt wurden.

#### Veranstaltungen

Zum Wissenstransfer vom TZW in die Praxis der Wasserversorgung gehörten wiederum die etablierten TZW-Kolloquien in Karlsruhe und Dresden, an denen etwa 300 Experten von Versorgungsunternehmen, Behörden und Industrieunternehmen teilnahmen. Auf reges Interesse stieß zudem die TZW-Diskussionsreihe zum Thema „Spülung von Trinkwasserverteilungssystemen“, wobei ein zentrales Element die vom TZW entwickelte zustandsorientierte Netzspülung und deren Implementierung in der Praxis war. Die Print- und Online-Medien des TZW erhielten im Berichtszeitraum weiteren Zuwachs. Hierbei handelt es sich um fünf Bände der TZW-Schriftenreihe sowie um drei Newsletter. Die Homepage des TZW ([www.tzw.de](http://www.tzw.de)) informierte regelmäßig über aktuelle Projekte der Wasserforschung.

### TZW vernetzt

In zwei TZW-internen Seminaren wurden die Herausforderungen und Chancen der Digitalisierung sowohl hinsichtlich zukunftsorientierter Produkte für die Wasserversorgung als auch hinsichtlich digitaler Geschäftsabläufe innerhalb des TZW diskutiert und entsprechende Maßnahmen eingeleitet. In Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Karlsruhe fand am 14.11.2018 im TZW der Tech-Transfer „Digitalisierung in der Wasserversorgung“ statt, bei dem Vertreter der Wasserversorgung und IT-Experten gemeinsam neu in der Praxis umgesetzte und künftige Lösungen diskutierten.

Im Rahmen von mehreren durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Forschungsprojekten führten Mitarbeiter des TZW wiederholt in mehreren Ländern außerhalb Europas wie China, Indien, Peru und Vietnam Untersuchungen zur Trinkwasserversorgung durch (**Bild 4.7**). Der Vorsitz der Global Water Research Coalition (GWRC), einer Vereinigung der international führenden Wasserforschungsinstitute und -unternehmen, oblag bis zur Herbstsitzung des Board of Directors dem TZW. Nach drei Jahren Amtszeit wechselte der Vorsitz turnusmäßig und liegt nun bei den Kollegen aus Australien.

Die hohe Expertise des TZW spiegelt sich ebenfalls in der aktiven Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien und Netzwerken wieder. So gestaltet das TZW mit seinen wissenschaftlichen Mitarbeitern in über 80 Arbeitsgruppen aktiv die Zukunft des Wasserfaches. Im Berichtszeitraum wurde dafür ein Leistungsaufwand von ca. 300 Tagen aufgebracht. Dies verdeutlicht die gute nationale und internationale Position und Reputation des TZW.

Mit Stand zum 31.12.2018 befanden sich am TZW 47 Forschungsvorhaben in Bearbeitung, die im Wesentlichen durch BMBF, BMWi, DVGW und EU gefördert wurden. Im gleichen Zeitraum wurden am TZW 68 Publikationen in Fachbüchern und -zeitschriften bzw. Konferenzunterlagen angefertigt. Die vollständige Publikationsliste steht über die Homepage des TZW zum Download zur Verfügung. Davon sind zehn Publikationen beispielhaft nachstehend aufgeführt.

- [24] *Ball, T.; Kiefer, J.*: Durchwachsene Silphie – Untersuchungen zum Nitratstickstoffgehalt des Bodens an vier Standorten. *Biogas Journal* 5, 46-49 (2018).
- [25] *Happel, O.; Armbruster, D.; Rott, E.; Minke, R.; Gast, M.*: Phosphonate in der aquatischen Umwelt. *Vom Wasser* 116(2), 53-56 (2018).
- [26] *Janda, J.; Nödler, K.; Brauch, H.-J.; Zwiener, C.; Lange, F. T.*: Robust trace analysis of polar (C2-C8) perfluorinated carboxylic acids by liquid chromatography-tandem mass spectrometry: method development and application to surface water, ground-water and drinking water. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1731-x> (2018).
- [27] *Klinger, J.; Müller, U.; Merkel, W.; Schwesig, D.; Gröschl, F.*: Innovativ. Praxisnah. Vernetzt. Die DVGW-Forschungsstrategie Wasser 2025. *DVGW energie|wasser-praxis* 10/2018, 98-105 (2018).

- [28] *Korth, A.; Donath, O.*: Zustandsorientierte Spülstrategie für Trinkwassernetze. *DVGW energie|wasser-praxis* 11/2018, 36-41 (2018).
- [29] *Lange, F. T.; Riegel, M.; Janda, J.; Brauch, H.-J.*: Analytik kurzketziger PFAS und deren technische Entfernung durch Ionenaustausch. *DVGW energie|wasser-praxis* 05/2018, 64-71 (2018).
- [30] *Müller, U.; Groß, H.-J.; Haist-Gulde, B.*: Hybridkreislaufsystem für die Partikel- und Spurenstoffentfernung. *gwf-Wasser|Abwasser* 159/5, 129-137 (2018).
- [31] *Nürnberg, G.; Nödler, K.; Lange, F. T.; Schäfer, C.; Huber, K.; Scheurer, M.*: Nachweis von polyfluorierten Alkylphosphatestern (PAP) und Perfluoroktansulfonamido-ethanol-basierten Phosphatestern (SAmPAP) in Böden. *Mitt Umweltchem Ökotox.* 24. Jahrg. / Nr. 2, 28-32 (2018).
- [32] *Turković, R.; Feinauer, F.*: Standardisierung eines Testverfahrens zur bauseitigen Qualitätsbeurteilung der Beschichtungsausführung von Epoxidharz-beschichteten Trinkwasser-Stahlbehältern. *DVGW energie|wasser-praxis* 02/2018, 22-29 (2018).
- [33] *Wricke, B.; Bornmann, K.; Schmidt, W.; Nüske, G.*: Chloratkonzentration in Trinkwässern in Deutschland. *DVGW energie|wasser-praxis* 03/2018, 42-47 (2018).

### 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



#### Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb

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



#### Dr. rer. nat. Josef Klinger

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

